SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

Les arbres GARDIENS DE LA TERRE

p.32

Les nouvelles espèces pour sauver le climat et le sol

HYDROGÈNE
Le pari de l'avion du futur p.50

EXOLUNES
Les promesses d'une vie extraterrestre p.46

MYOPIE
Comment la prévenir et la soigner p.62

MAI 2022 - N° 903 - ALLEMAGNE 7,40 € / AUTRICHE 7,40 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / DOM 5,90 € / DOM-AVION 7,90 € / ANDORRE 5,40 € / PORTUGAL 5,70 € / POM 880 XPF / ILE MAURICE 8,40 € / TOM/AVION 1500 XPF / SUISSE 8,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA 10,49 $ CAD

L 13418 - 903 S - F: 5,30 € - RD

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 903 - MAI 2022 - LES ARBRES GARDIENS DE LA TERRE

Plus de 50 % des jeunes non diplômés sont au chômage.*

APPRENTIS D'AUTEUIL

Il est urgent d'agir. La Fondation Apprentis d'Auteuil accompagne chaque année 30 000 jeunes pour transformer leur avenir. Ensemble, prenons le parti des jeunes !

LA CONFIANCE PEUT SAUVER L'AVENIR

*Injep, 2021.

Agence Marcel - © Aurélien Chauvaud.

BERNARD MARTINEZ

Dominique Leglu
Directrice éditoriale

Pourquoi pas les abysses ?

Oasis de vie, c'est par ce joli nom qu'elles furent célébrées avec moult images sous-marines lors de leur découverte à la fin des années 1970. Aujourd'hui, bien moins poétique, on les appellera pompes à carbone. Des mots pas très beaux mais pour une bonne nouvelle : les sources hydrothermales aux panaches photogéniques, près des dorsales océaniques, capturent dans les abysses deux fois plus de carbone qu'on ne le croyait jusqu'à présent. Et ce n'est pas du cinéma.

84 % de Français inquiets. Merci les microbes friands du CO_2 dans ces sources, comme l'a montré une équipe internationalement reconnue de 12 chercheurs d'Ifremer, IRD, CNRS, universités de Brest, Aix-Marseille, Toulon. La nouvelle mettra-t-elle un peu de baume au cœur des 84 % de Français qui se disent inquiets en raison du dérèglement climatique, comme l'avait mesuré un sondage de notre confrère *Challenges* en septembre 2021 ? On ne saurait s'en contenter. Car la situation est alarmante, ont martelé les trois derniers rapports du Giec d'août 2021, fin février et début avril derniers.

L'envol vers 3,2 °C. Si l'alerte des deux derniers rapports a pu sembler mise en sourdine, avec une situation internationale bouleversée par la guerre en Ukraine, les faits sont là. Les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère continuent de croître, alors qu'il faudrait drastiquement les inverser et vite. Si la trajectoire annoncée à la COP26 à Glasgow (Royaume-Uni) en novembre 2021 se poursuit, adieu la barre de 1,5 °C d'augmentation de la température du globe, c'est un envol vers 3,2 °C d'ici à la fin du XXIe siècle. Comprenons catastrophe climatique.

30 % du gaz carbonique de l'atmosphère. Force est alors de se tourner vers l'océan. Ce dernier est capable en effet d'absorber jusqu'à 30 % du gaz carbonique de l'atmosphère. Merci à la physique — le CO_2 se dissout en surface puis plonge vers le fond — mais aussi à la biologie et à tous les micro-organismes mangeurs de gaz. Si le climat n'a pas brutalement basculé, c'est parce que celui qui recouvre 70 % de la surface terrestre est parvenu jusqu'ici à le réguler. Ce rôle majeur ne semble pas, cependant, avoir frappé à sa juste mesure les esprits des Terriens que nous sommes. Combien de temps pourra-t-il le jouer ?

Méthane emprisonné. Les campagnes océanographiques qui se mènent au niveau international, où les scientifiques français font excellente figure, sont indispensables pour y répondre. Il faut notamment mieux connaître les espèces qui peuplent les sédiments des profondeurs, et séquencer leurs génomes comme dans le projet « Pourquoi pas les abysses – eDNAbyss ». Mieux comprendre aussi le devenir du méthane emprisonné dans des glaces du fond des océans, comme celui ausculté à l'été 2021 par le navire *Pourquoi pas ?* en… mer Noire. On s'interroge à ce stade. À quel point la guerre actuelle va-t-elle bouleverser nombre de ces recherches fondamentales, là comme en Arctique, Antarctique et ailleurs ? Ce n'est pas la moindre des inquiétudes. ■

@dominiqueleglu

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« Que valent les alternatives au sucre raffiné ? »

(*Sciences et Avenir – La Recherche*, n° 902, avril 2022)

Dans l'article, vous dites qu'il ne faut pas abuser du sirop de bouleau. Ce qui paraît en contradiction avec les affirmations mentionnées sur les paquets de xylitol. Le sucre de bois de bouleau est-il bon pour la santé, ou pas ? **Patrick Mercier**

S. et A. : Il est préférable de ne pas abuser de sirop de bouleau (obtenu par l'évaporation de la sève de bouleau fraîche) car il contient beaucoup de fructose qui, en excès, peut être délétère pour le foie. Toutefois, ce sirop est riche en vitamines et en oligo-éléments, et grâce à son goût légèrement sucré, il peut donc tout à fait remplacer le sucre en poudre, dans un gâteau par exemple. Le xylitol est extrait, lui, de l'écorce de bouleau. Il s'agit d'un sucre naturel très utilisé car il a un pouvoir sucrant assez proche du sucre mais un apport calorique inférieur (2,4 kcal/g contre 4 kcal/g). Il a aussi un index glycémique très bas, ce qui signifie que le consommer ne provoque pas de pic de glycémie. En revanche, le xylitol fait partie de la famille des édulcorants appelés « polyols » (qui sont des sucres dérivés de l'alcool). Il est légèrement laxatif et peut provoquer des troubles digestifs. Vous pouvez donc le consommer mais à petites doses.

Forme de l'œuf

Je suis surpris que la description mathématique de la forme d'un œuf (*S. et A.* n° 899, janvier 2022) ait si longtemps échappé à notre connaissance ! Les courbes de Lissajous sont connues depuis 1857. Nous les utilisions à l'Onera en 1958 pour tracer des profils d'ailes et d'aubes de turbines.

Gérard Garnier

S. et A. : En effet, il est tout à fait possible de reproduire la forme d'un œuf en utilisant notamment les courbes de Lissajous. Cependant, cela ne permet pas de modéliser l'ensemble des formes que peuvent prendre les œufs. En 2021, une équipe internationale de chercheurs britanniques et ukrainiens a réussi, pour la première fois, à formuler une équation universelle de la forme des œufs. Celle-ci utilise quatre dimensions de l'œuf pour déterminer sa forme : sa longueur, sa largeur maximale, le décalage de son axe vertical et le diamètre au quart de sa longueur. Grâce à cela, les chercheurs peuvent déterminer n'importe quelle forme ovoïde, allant de celle d'une balle de ping-pong à celle d'une poire.

Précisions

Miroir. Dans le reportage sur le Laboratoire souterrain à bas bruit (*S. et A.* n° 902, p. 51), la société Winlight n'a pas participé à la réalisation des miroirs du spectrographe NIRSpec du télescope spatial James-Webb, mais à la fabrication de la plaque qui supporte l'instrument. Ces miroirs ont en fait été réalisés par Safran Reosc.

Ciment. Dans l'article « Décarboner l'industrie » (*S. et A.* n° 902, p. 62), le kaolin n'entre pas dans la composition du clinker (constituant du ciment), dont la matière de base est l'argile.

Chez votre marchand de journaux

Et aussi sur smartphone et tablette

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Carole Chatelain
Directrice de la rédaction

La plénitude des arbres

La guerre qui ravage une grande partie de l'Ukraine est une tragédie humaine, mais aussi — toutes proportions gardées — un véritable défi scientifique. Comme nous l'analysions dans notre numéro précédent (*Sciences et Avenir-La Recherche* n° 902), un nouveau rideau de fer s'est en effet abattu entre la Russie et l'Europe, privant nombre de chercheurs russes de tout contact avec leurs homologues, et réciproquement. Dans ce numéro, nous avons choisi d'enquêter sur les conséquences, pour la France, d'un brusque arrêt — toujours possible parmi les sanctions envisagées — d'approvisionnement de l'Europe en gaz depuis les gazoducs russes, qui assurent aujourd'hui 17 % de notre consommation. Notre pays pourrait-il tenir le choc ? Oui, assure notre journaliste Loïc Chauveau. C'est à moyen terme que la France peut atteindre son autosuffisance gazière et ce grâce à des techniques, anciennes ou pionnières, que nous décrivons en détail *(p. 8)*. Mais ce numéro est également riche de promesses et de découvertes !

> « Les 3000 milliards d'arbres sur Terre sont les gardiens de notre planète. Les scientifiques plaident pour que l'humanité noue avec eux une nouvelle alliance »

Comme celle, très probable, de la première exolune : notre journaliste Franck Daninos décrit ces satellites susceptibles d'abriter — qui sait ? — certaines formes de vie. C'est la raison pour laquelle les scientifiques les traquent, n'hésitant pas à penser qu'elles seraient des havres encore plus favorables que la Terre *(p. 46)* ! Voir aussi loin, c'est bien le défi que tentent aussi de relever, dans un tout autre domaine, les médecins spécialistes de la myopie. Sylvie Riou-Milliot nous explique que des solutions émergent non seulement pour guérir cette affection de la vue, mais aussi pour la prévenir, comme ces verres « freinateurs » formés de milliers de microlentilles *(p. 62)*. Enfin, bien sûr, au moment où le Giec — ce groupement de milliers de spécialistes internationaux — ne cesse d'alerter sur le dérèglement climatique, nous vous apportons tous les éléments pour comprendre à quel point les 3000 milliards d'arbres sur Terre sont les gardiens essentiels de notre planète. Les scientifiques plaident pour que l'humanité noue avec eux une nouvelle alliance. Excellents producteurs d'oxygène, ce sont aussi des épurateurs de polluants et des régulateurs de température. De leur cime à leurs racines, ils sont indispensables à notre survie. Il est vital de les sauver *(p. 32)*. ■ @carolechatelain

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (12 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Directrice de la rédaction Carole CHATELAIN - 01.55.35.56.57
assistée de Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Rédacteurs en chef Mathieu NOWAK (mensuel) - 01.55.35.56.38
Philippe PAJOT (La Recherche) - 01.70.98.19.29
Vincent REA (hors-série) - 01.55.35.56.35
avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Olivier LASCAR (digital) - 01.55.35.56.15
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la direction de la rédaction
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Hugo JALINIÈRE (actualités, médecine) - 01.55.35.56.52
Rédaction Bernadette ARNAUD (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.44 - Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, A. CARRÉ, , P. KALDY, F. MALLORDY
Secrétaire de rédaction
Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Maquette Horia BAHRI - 01.55.35.56.19
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Marine BENOIT (fondamental, archéologie) - 01.55.35.56.23 - Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70 - Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24 - Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15 - Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56
Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Clémence BAUDOIN - responsable projets digitaux
Jessica RIOS - cheffe de projet digital
Documentation Isabelle DO O'GOMES (cheffe de service) - 01.55.35.56.49 - Astrid SAINT AUGUSTE - 01.55.35.56.48
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Directeur général Philippe MENAT
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Christophe PERRUSSON
Publicité MediaObs. 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur délégué Philippe LÉONARD - 01.44.88.89.18
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Sciences et Avenir SAS
Président, Directeur de la publication : Claude PERDRIEL
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL
Multimédia Sciences et Avenir, 41 bis, avenue Bosquet, 75007 Paris. - Tél. : 01.55.35.56.00

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,014 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org

FR

ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte un encart « L'Obs – la montre à mouvement automatique », un encart « L'Histoire-Atlas Historique de la France » sur toute la diffusion abonnés ; ainsi qu'un message « First Voyages-Chypre » et un message « First Voyages-Cappadoce » sur une partie de la diffusion abonnés. Commission paritaire n° 0625 K 79712. ISSN 00368636. Distribué par MLP.

MARTIN FOURCADE
CHAMPION DU MONDE &
CHAMPION OLYMPIQUE
DE BIATHLON

MGEN, Mutuelle Générale de l'Éducation Nationale, immatriculée sous le numéro SIREN 775 685 399, MGEN Vie, immatriculée sous le numéro SIREN 441 922 002, MGEN Filia, immatriculée sous le numéro SIREN 440 363 588, mutuelles soumises aux dispositions du livre II du Code de la mutualité. MGEN Action sanitaire et sociale, immatriculée sous le numéro SIREN 441 921 913, MGEN Centres de santé, immatriculée sous le numéro SIREN 477 901 714, mutuelles soumises aux dispositions du livre III du Code de la mutualité. Siège social : 3 square Max-Hymans - 75748 Paris CEDEX 15.

SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche / N° 903 / Mai 2022

DOSSIER P. 32

Les arbres, gardiens de la Terre

Surexploités pendant des siècles, les arbres sont pourtant indispensables à notre survie. Régulateurs des pics de chaleur en ville, capteurs de gaz à effet de serre... La liste est longue de leurs bienfaits. Les scientifiques plaident pour une nouvelle alliance avec ces anges gardiens de notre planète.

P. 46

Les exolunes se dévoilent enfin

Des astronomes pensent avoir débusqué un astre orbitant autour d'une exoplanète. Une découverte qui, si elle se confirmait, ouvrirait un nouveau champ de recherche prolifique.

P. 62

De nouvelles techniques contre la myopie

Les traitements pour corriger ce défaut de la vue qui touche de plus en plus de personnes en France et dans le monde ont fait des progrès. Revue de ces nouvelles approches.

P. 76

Khashabiyeh, un sanctuaire inédit au cœur du désert

De gigantesques pièges, baptisés « cerfs-volants du désert » et liés à des chasses de masse, ont été découverts en Jordanie. Ils dévoilent une installation rituelle sans précédent.

3 **Éditorial** par Dominique Leglu

4 **Courrier**

5 **Édito** par Carole Chatelain

ÉVÉNEMENT

8 **Guerre en Ukraine. Comment la France peut atteindre l'indépendance gazière**

SCIENCES FONDAMENTALES

14 **ACTUALITÉS** Les trous noirs possèdent une chevelure quantique / Des drones pour chasser les météorites

46 **Exolunes : elles se dévoilent enfin**

50 **Un laboratoire volant pour l'avion à hydrogène**

NATURE

18 **ACTUALITÉS** Quand les pies se jouent des scientifiques / Des panneaux solaires toujours propres

54 **Odorat des insectes : le comprendre permettra de sauver les cultures**

59 **Des câbles vivants vont dépolluer les sols**

84 **Dossier spécial. Tri, énergies vertes : cinq questions pour s'améliorer**

SANTÉ

24 **ACTUALITÉS** Un implant cérébral libère un patient de son enfermement / Un traitement efficace contre la chute des cheveux

62 **Myopie : de nouvelles techniques freinent son évolution**

68 **Entretien avec Philippe Sansonetti,** microbiologiste

70 **La révolution des greffes d'organes issus d'animaux**

74 **Nutrition : salade bien composée vaut déjeuner**

HISTOIRE

28 **ACTUALITÉS** Un très rare sarcophage sous Notre-Dame / Au Sahel, Agadez conserve son patrimoine en 3D

76 **Khashabiyeh, un sanctuaire inédit au cœur du désert**

81 **L'« Endurance » enfin retrouvé cent ans après son naufrage**

TRANSVERSALES

88 **Sélection livres**

92 **Expositions**

93 **Le ciel de mai**

94 **Chroniques**
Climat par Céline Guivarch et Christophe Cassou / Mathématiques par Sylvie Benzoni / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia

96 **Questions de lecteurs**

97 **Jeux**

VINCENT MARTIN / NATURIMAGES - HELENA VALENZUELA WIDERSTRÖM/ COLUMBIA UNIVERSITY - GETTY IMAGES - MISSION ARCHÉOLOGIQUE DU SUD-EST JORDANIEN.

Guerre en Ukraine

Comment la France peut atteindre l'indépendance gazière

Le conflit russo-ukrainien relance avec force le débat sur la dépendance énergétique. Des solutions techniques se développent pour accroître la production de biogaz qui pourrait à terme remplacer l'importation de gaz naturel. Explications.

Par Loïc Chauveau @Loic_Chauveau

Avec le conflit en Ukraine, la question est devenue brûlante : peut-on se passer du gaz russe (qui compte pour 17 % des importations françaises) ? Dans un contexte d'élection présidentielle, c'est toute la question de l'indépendance énergétique nationale qui est posée. Et, peu le savent, mais celle-ci est tout à fait possible pour le gaz. Car en France, on n'a pas de pétrole mais on a… des déchets que l'on peut valoriser pour alimenter le réseau avec du biométhane. Directeur général de GRTgaz, le gestionnaire du réseau national de distribution, Thierry Trouvé n'hésite pas à parler de *« troisième révolution gazière »* : *« Au XIXe siècle, le gaz de ville était produit par des usines à charbon au cœur même des agglomérations françaises. Au cours du XXe siècle, il est devenu moins cher d'importer du gaz naturel de Norvège, d'Algérie ou de Russie. Avec le biométhane, on revient à une production locale totalement indépendante des aléas géopolitiques. »*

Et ce gaz français est déjà une réalité. Les digesteurs, qui abritent la dégradation de la matière organique par des bacté-

RISQUES SANITAIRES

Rassurer les opposants à la méthanisation

Les opposants à la filière méthanisation évoquent les risques d'accident voire d'explosion, la circulation de camions, les pollutions d'eau par les épandages des digestats. L'accident de Châteaulin (Finistère) d'août 2020, où 400 m³ de digestats ont pollué la rivière Aulne, a mis l'accent sur les risques de cette activité. Depuis 2016, 70 incidents ont été listés par les services de l'État, tous d'une gravité moindre, et leur nombre tendrait à baisser alors que les exploitations se multiplient, affirme le Syndicat des énergies renouvelables (SER). Aussi celui-ci mise sur l'application d'un label de qualité et d'un contrat de progrès en direction des exploitants.

Très utilisé en usage domestique, le gaz naturel, issu directement du sous-sol, devrait être peu à peu remplacé par du biogaz.

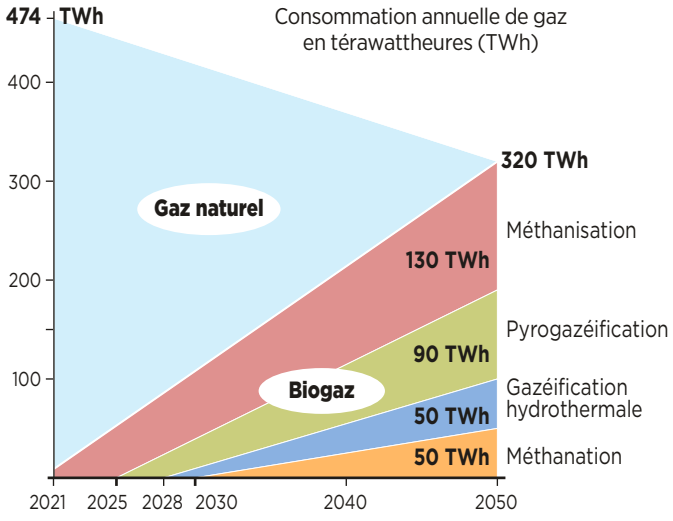
INFOGRAPHIES: BRUNO BOURGEOIS/SOURCE GRTGAZ- XFENTINO/GETTY IMAGES

ries, essaiment dans les campagnes *(voir l'infographie p. 10)*. En 2021, 365 sites ont injecté dans les conduites pour 6,4 térawattheures (TWh) de gaz qui se mêlent au flux de gaz fossile. C'est un peu plus de 1 % des 474 TWh consommés l'an dernier en France. Mais la production était nulle en 2015 et plus de 1000 projets sont en cours d'instruction, si bien que 19 TWh vont s'ajouter dans les deux ou trois prochaines années. « *On devrait être à 20 % de la consommation nationale en 2030 et atteindre l'indépendance en 2050* », assure Thierry Trouvé. Un optimisme raisonnable puisque l'obstacle du prix est en train d'être levé. Alors qu'en 2010, le prix du m³ de gaz naturel revenait à moins de dix euros le mégawattheure (MWh), celui du biogaz culminait à 95 euros. La reprise économique post-Covid et surtout la guerre en Ukraine ont changé la donne. En ce printemps 2022, le gaz naturel est à plus de 100 euros. Enfin, l'objectif est d'autant plus facilement atteignable que la consommation de gaz naturel est appelée à drastiquement diminuer, jusqu'à 320 TWh en 2050 *(lire l'encadré p. 12)*.

Le gisement exploitable pour produire du biométhane est conséquent avec les effluents d'élevage, les résidus de culture, les cultures énergétiques spécifiques ou plantées entre deux récoltes. 230 sites appartiennent à des agriculteurs seuls, et 79 à des regroupements d'exploitants. S'y ajoutent les boues et coproduits de la transformation des végétaux et animaux par l'industrie agroalimentaire, les sous-produits des abattoirs, les déchets

En 2050, les biogaz pourront remplacer tout le gaz naturel

La montée en puissance de la méthanisation, associée à trois autres technologies innovantes, devrait permettre à la France de se passer complètement de gaz naturel en provenance notamment de Russie.

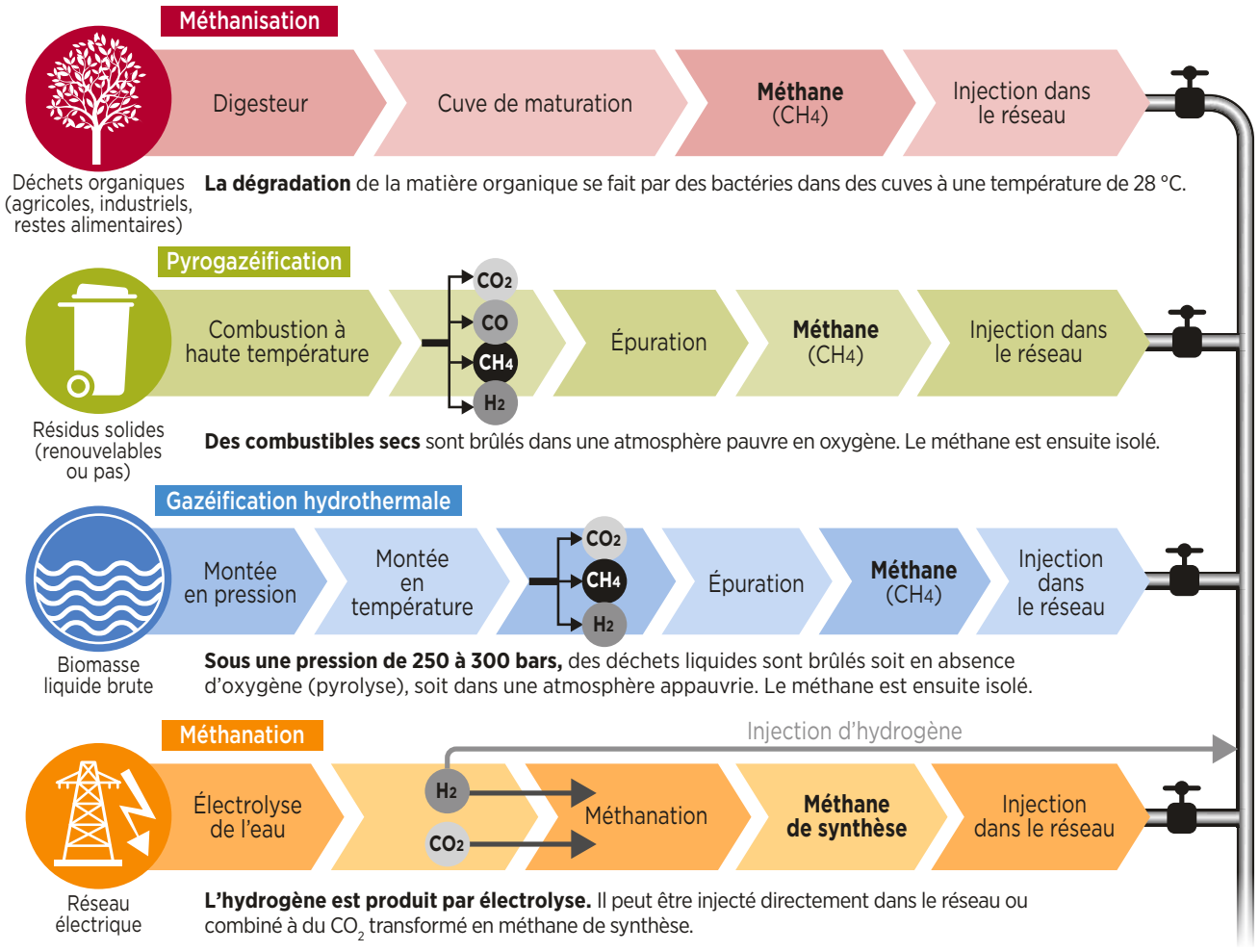


ménagers, les déchets verts, les boues de stations d'épuration des eaux usées urbaines. *« Si l'on exploite intelligemment tout ce potentiel, et sans entrer en concurrence avec l'alimentation, nous pouvons atteindre 130 TWh en 2050 »*, calcule Thierry Trouvé. Ambitieux mais encore insuffisant. *« Notre chance, c'est que des technologies en cours de développement sont en train de démontrer leur pertinence »*, rassure Anthony Mazzenga, directeur gaz renouvelables et hydrogène à GRTgaz. Leurs noms : pyrogazéification, gazéification hydrothermale, méthanation. De quoi s'agit-il précisément ? Avec la pyrogazéification, on quitte le domaine de la biologie pour entrer dans celui de la combustion. Elle consiste à brûler des déchets solides dans une atmosphère appauvrie en oxygène. Ce qui conduit à la formation d'un mélange de gaz, dont une majorité de méthane. La matière première ? *« Ce sont des restes de l'exploitation forestière et de l'industrie du bois, mais aussi des produits de consommation en fin de vie comme des meubles, des tissus, des chiffons, des mousses, des mélanges de matériaux »*, énumère Anthony Mazzenga. Ces déchets réunis sous le vocable de « combustible solide de récupération » (CSR) sont aujourd'hui en grande partie enfouis en décharge ou incinérés. Et seulement 300 000 tonnes de CSR et déchets solides sont pour l'heure exploités, alors que le gisement est estimé à 2,5 millions de tonnes par an.

Les acteurs sont donc très différents de ceux de la méthanisation. En cours de constitution, la filière regroupe des collectivités en charge de la collecte des ordures ménagères, des éco-organismes

PRODUCTION

Quatre technologies pour obtenir du biogaz



CARDHU™

SINGLE MALT SCOTCH WHISKY

Legendary

SINCE 1824*

Début du XIXème siècle, sur les bords de la rivière Spey au nord de l'Ecosse, les Cumming, une famille visionnaire et passionnée, fondent la distillerie Cardhu devenue aujourd'hui mythique. Elégant et fruité, leur single malt à la rondeur exceptionnelle se distingue rapidement, allant jusqu'à définir le style de toute la région du Speyside, berceau des whiskies d'Ecosse.

Une légende est née.

LE MOT CARDHU ET LES LOGOS ASSOCIÉS SONT DES MARQUES PROTÉGÉES. © DIAGEO 2022 MHD - RCS NANTERRE 337 080 055 - 105 BOULEVARD DE LA MISSION MARCHAND - 92400 COURBEVOIE. *Légendaire depuis 1824

L'ABUS D'ALCOOL EST DANGEREUX POUR LA SANTÉ. À CONSOMMER AVEC MODÉRATION.

qui gèrent les contributions pour financer le tri sélectif et des grands opérateurs de la valorisation des matières (Veolia, Suez). En France, le pilote industriel Gaya, géré par Engie sur le site de Saint-Fons (Rhône), teste depuis 2018 un four qui traite du bois issu du secteur de l'emballage mais aussi des noyaux d'olive, des coques d'amandes, des écorces, de la paille non alimentaire, avec l'idée de vendre des unités clés en main aux acteurs des déchets. En mars, Ecomobilier, l'organisme chargé de financer la collecte et le recyclage des meubles, et le Syctom, syndicat de traitement des ordures ménagères de Paris et des départements de la petite couronne, ont signé avec GRTgaz un protocole d'accord pour valoriser par pyrogazéification les combustibles solides de récupération, les rebuts de papier des centres de tri de l'agglomération et les rebuts de bois traités, vernis ou peints. « *En France, on compte aujourd'hui une quinzaine de pilotes industriels qui préparent la phase de développement* », commente Anthony Mazzenga.

Une solution pour les digestats de méthanisation

Pour la gazéification hydrothermale, le gisement est composé de déchets humides comme les effluents organiques de l'industrie agroalimentaire ou papetière, les boues de station d'épuration, et en général tous les digestats de méthanisation qui ne pourraient être épandus sur des terres agricoles. Le procédé, qui consiste à brûler sous 250 bars de pression et 400 °C par pyrolyse ou 700 °C en atmosphère appauvrie en oxygène, est bien maîtrisé, mais le passage au pilote industriel débute seulement. Le plus grand démonstrateur au monde est situé à Alkmaar (Pays-Bas) avec une capacité de traitement de 16 tonnes par heure.

Enfin, les gaziers portent beaucoup d'espoir dans la méthanation. Cette fois-ci pas de déchets. L'idée est d'utiliser de l'hydrogène qui peut soit être injecté directement dans le réseau, soit servir à produire du méthane en faisant réagir du CO_2 capté à la cheminée d'une usine voisine. Une réaction qui demande une grande quantité d'électricité, dont l'origine doit être renouvelable. « *C'est une façon de valoriser l'énergie produite en excès les jours de grand vent ou de fort ensoleillement* », table Anthony Mazzenga. Cette électricité alimente depuis 2020 des des électrolyseurs à Fos-sur-Mer, dans le cadre du projet « Jupiter 1000 ».

Avec cet éventail de solutions, les gaziers ne doutent pas que l'indépendance est tout à fait atteignable. Avec une volonté politique affirmée, elle pourrait même arriver beaucoup plus tôt que 2050. D'autant que les injonctions du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), dans son rapport remis le 4 avril, sont de réduire les émissions de gaz à effet de serre dès cette décennie. « *Nous nous trouvons à la croisée des chemins. En prenant les bonnes décisions aujourd'hui, nous pouvons garantir un avenir vivable. Nous disposons des outils et du savoir-faire nécessaires pour limiter le réchauffement* », a assuré Hoesung Lee, le président du Giec. Et parmi ces outils figure en tout premier plan l'accélération de « la troisième révolution gazière ». ■

STEPHANE AUDRAS/REA

Les agriculteurs se regroupent pour créer des sites de production de biométhane à partir des déchets organiques de leur exploitation (ici Chand'Energies, dans l'Ain).

CONSOMMATION

Pourquoi les besoins en gaz vont diminuer

Si la consommation de gaz va diminuer en trente ans de 470 à 320 térawattheures (TWh), c'est notamment à cause de l'électrification des besoins. Du fait de la lutte contre le changement climatique, le chauffage au gaz naturel, qui équipe un tiers des maisons individuelles et la moitié des immeubles collectifs et de bureaux, va laisser progressivement la place aux pompes à chaleur et l'industrie devra se décarboner. Si la consommation énergétique totale de la France va passer de 1600 TWh aujourd'hui à 965 TWh grâce aux progrès techniques et aux politiques d'économie d'énergie, la consommation d'électricité passera, elle, de 430 à 645 TWh en 2050, couvrant ainsi 55 % des besoins, contre 25 % aujourd'hui. Quant aux énergies fossiles, qui assurent actuellement 60 % de la consommation, elles auront disparu ou presque au milieu du siècle.

Repoussez les limites en mode Wifissime

Nouveau : Livebox Max Fibre

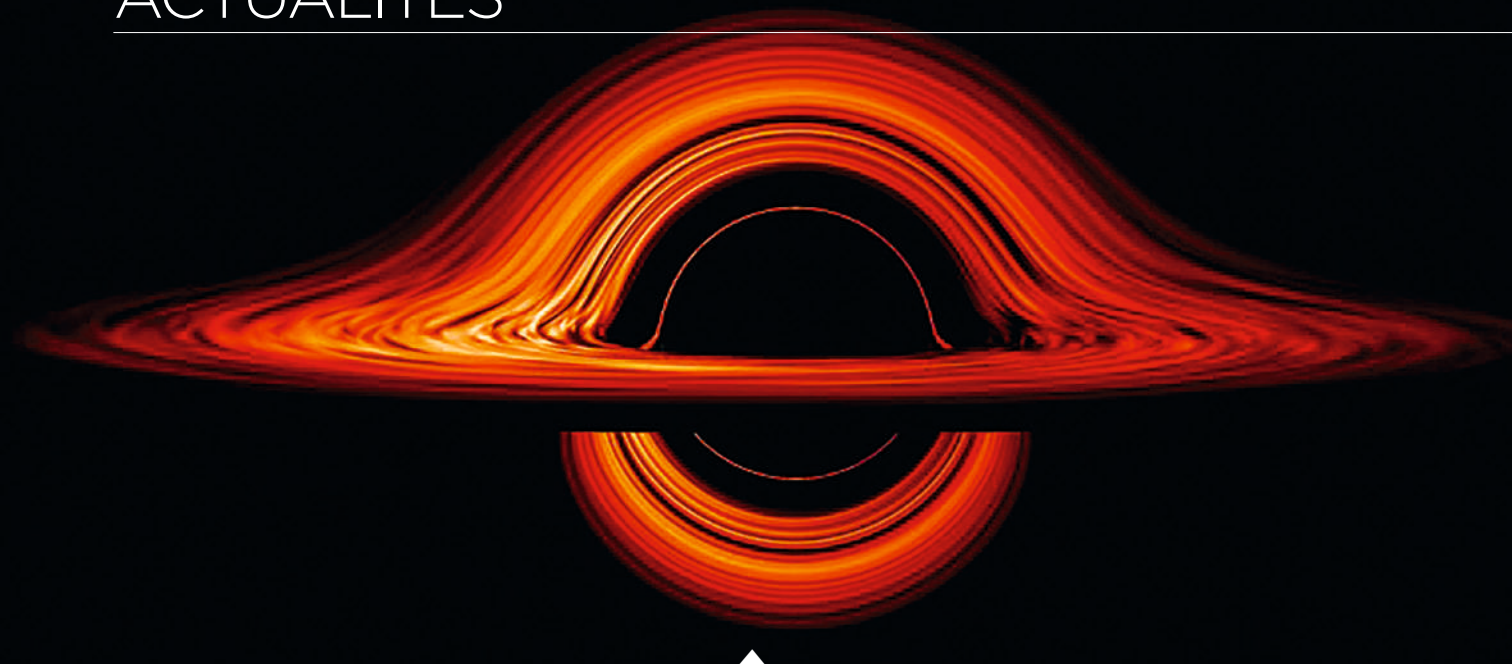
Avec cette offre, accédez à une connexion ultra performante grâce à la nouvelle Livebox 6 intégrant le Wifi dernière génération, le Wifi 6E, qui permet de profiter pleinement de la puissance de la fibre. Nos Spécialistes Wifi sont à votre service pour optimiser l'efficacité de votre connexion chez vous, et vous proposent si besoin jusqu'à 3 Répéteurs Wifi 6. Et votre connexion vous suit partout grâce à l'Airbox 20 Go fournie sur demande.

C'est ça le mode Wifissime !

Offre soumise à conditions en France métropolitaine. Services sous réserve d'éligibilité et de couverture, disponibles exclusivement avec les offres Livebox Max Fibre et Open Max Fibre, et avec équipements Wifi compatibles. Répéteurs et Airbox sur demande. Détail et tarifs sur orange.fr

Répéteurs Wifi 6 : dans la limite d'un par demande chaque 72 h sur orange.fr - Le nombre de répéteurs dépend de la taille du logement. **Spécialistes Wifi :** accompagnement téléphonique sur rendez-vous pris sur orange.fr, selon disponibilité, ou via appel au Service Client du lundi au samedi de 8 h à 20 h. Le temps d'attente avant la mise en relation avec un conseiller est gratuit depuis les réseaux Orange. Le service est gratuit et l'appel est au prix d'une communication normale selon l'offre détenue, ou décompté du forfait mobile. **Airbox :** option de connexion internet en mobilité, mise à disposition d'une Airbox 4G et d'une carte SIM. Débit réduit au-delà. Sessions limitées à 12 h.

orange™



La matière avalée par un trou noir ne disparaît pas, mais laisserait une faible empreinte dans le champ gravitationnel de l'astre (modélisation).

Les trous noirs possèdent une chevelure quantique

Une équipe d'astrophysiciens aurait trouvé la solution au fameux paradoxe de l'information posé par les trous noirs et soulevé par le physicien britannique Stephen Hawking.

Non, les trous noirs ne sont pas chauves, mais posséderaient des « cheveux quantiques » ! C'est par cette énigmatique formule que peuvent se résumer les travaux d'une équipe d'astrophysiciens qui affirme avoir résolu le paradoxe de l'information mis en évidence par le physicien britannique Stephen Hawking, décédé en 2018. Dans les années 1960 en effet, le théorème du trou noir sans cheveux prétend que trois paramètres suffisent à décrire ces objets qui engloutissent tout, y compris la lumière : la masse, la charge électrique et le moment cinétique lié à la vitesse de rotation (ou spin). Car aucune trace d'information sur la matière avalée par les trous noirs n'est censée subsister, de sorte qu'ils se retrouvent… chauves en information.

Mais en 1975, Stephen Hawking comprend qu'il existe en réalité un phénomène d'évaporation des trous noirs à même de les faire disparaître, par le biais d'un rayonnement d'origine quantique, le rayonnement de Hawking. C'est là que le célèbre physicien prend conscience d'une incohérence monumentale : le fait qu'une information puisse s'évaporer à jamais est incompatible avec les lois de la mécanique quantique ! Ces dernières stipulent en effet qu'il est toujours possible de remonter le fil des événements pour déterminer les états précédant un état donné. Pourtant, la loi de la gravitation appliquée au trou noir dit l'inverse : rien de ce qui y entre ne peut en ressortir.

Une signature fossile quantique de la matière

C'est ce paradoxe qu'aurait résolu l'équipe de Xavier Calmet, physicien à l'université de Sussex (Royaume-Uni), en démontrant qu'il n'y a pas lieu de spéculer sur une physique nouvelle pour cela. Selon leurs deux études publiées par les revues *Physics Letters B* et *Physical Review Letters*, même absorbée par un trou noir, la matière laisse une faible empreinte dans le champ gravitationnel de l'astre. Une « chevelure quantique » qui ferait des trous noirs des objets bien plus diversifiés qu'on ne le pensait. « *Nous avons mathématiquement démontré qu'il y a une mémoire stockée dans le champ gravitationnel du trou noir* », explique le physicien. Ainsi, deux trous noirs de masse identique mais de composition interne différente présenteraient de très subtiles variations dans leur champ gravitationnel. La matière laisserait donc une sorte de « signature fossile quantique » de son passage. L'information ainsi préservée, le paradoxe de Hawking n'en serait plus un. ■ **M. B.**

NASA'S GODDARD SPACE FLIGHT CENTER/JEREMY SCHNITTMAN

La planète aux pierres précieuses

ASTRONOMIE Du métal liquide, mais aussi des rubis et des saphirs pourraient pleuvoir sur l'exoplanète WASP-121b, une Jupiter chaude. Les températures sur l'hémisphère qui fait face à son étoile sont si élevées que des nuages de titane, de fer et d'aluminium se forment. Ils se déversent sur le côté obscur, plus frais, où des éléments s'oxydent et se combinent pour former des pierres précieuses. **J. I.**

SOURCE : JESSICA SPAKE, INSTITUT DE TECHNOLOGIE DE CALIFORNIE, ÉTATS-UNIS.

13 milliards d'années

Le véritable âge de notre galaxie

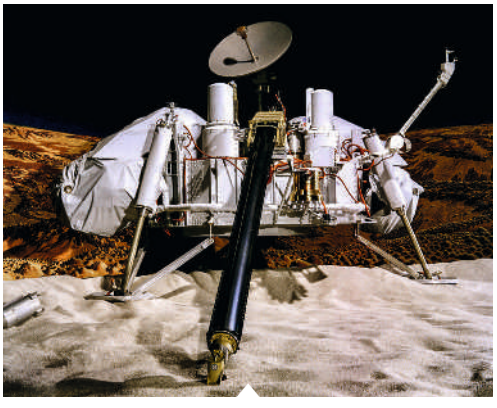
COSMOLOGIE La Voie lactée, qui héberge quelque 200 milliards d'étoiles, prend un « coup de vieux ». Selon une étude, certaines régions se seraient formées 2 milliards d'années plus tôt qu'on ne le croyait, soit 800 millions d'années après le Big Bang. **H. J.**

SOURCE : MAOSHENG XIANG, INSTITUT D'ASTRONOMIE MAX-PLANCK, ALLEMAGNE.

Récolte d'oxygène sur Mars

CHIMIE Détecter puis « récolter » l'oxygène piégé dans les roches de la planète Rouge : c'est le projet débuté par des géologues, supervisés par l'Agence spatiale européenne, qui développent de petits réacteurs grâce auxquels des composés réactifs du sol interagiraient avec d'infimes quantités d'eau pour libérer l'oxygène. 1,2 hectare de sol martien suffirait ainsi pour un astronaute tout au long de sa vie. **F. D.**

SOURCE : CHRISTOS GEORGIOU, UNIVERSITÉ DE PATRAS, GRÈCE.



NASA/JPL-CALTECH/UNIVERSITY OF ARIZONA

Extraire l'oxygène du sol est envisagé depuis 1976 avec les expériences de l'atterrisseur Viking de la Nasa *(photo)*.

NASA/STSCI

Voici la toute première image obtenue par l'instrument.

Le télescope James-Webb règle la mire

ESPACE Une étoile située à 2000 années-lumière de la Terre avec d'innombrables galaxies en arrière-plan, telle est la toute première image, très nette, obtenue par le télescope spatial James-Webb grâce à l'alignement de ses 18 miroirs hexagonaux. Un avant-goût prometteur de ce que ce télescope pourra dévoiler à partir de juin lorsqu'il sera pleinement opérationnel. **F. D.**

Des drones pour chasser les météorites

En Australie, la collaboration entre deux engins volants a permis de retrouver une chondrite possédant encore sa croûte de fusion.

CURTIN UNIVERSITY

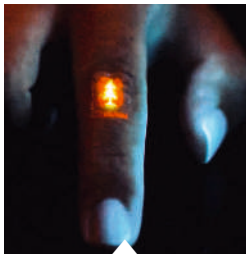
La pierre extraterrestre a pu être recueillie seulement quatre jours après sa chute.

Pour la première fois, une météorite fraîchement tombée sur Terre a pu être retrouvée grâce à un drone. L'événement remonte au mois d'avril 2021. Le système d'observation australien Desert Fireball Network détecte alors, durant trois petites secondes, une traînée lumineuse dans le ciel de la plaine de Nullarbor, au nord de la Grande Baie australienne. Les images permettent de délimiter une zone de recherche de 5,1 km^2. Un premier drone sillonne le secteur, muni d'une caméra associée à des algorithmes d'apprentissage automatique, entraînés à reconnaître des météorites. Des dizaines de candidates sont examinées ensuite à l'aide d'un second drone. La traque se resserre enfin sur quatre sites où se rendent des géologues de l'université Curtin, qui vont retrouver, quatre jours après la chute, une pierre extraterrestre de 5 cm de diamètre possédant encore sa croûte de fusion ! Si cette météorite de la famille des chondrites n'est pas rare, la méthode pourrait se révéler très utile pour dénicher des spécimens précieux. **F. D.**

Un écran dans la peau

TECHNOLOGIE Un écran souple et extensible, prêt à épouser les moindres replis de l'épiderme, c'est le dispositif d'affichage lumineux mis au point par une équipe américaine. Son nouveau type de polymère élastique possède une luminosité maximale jusqu'à deux fois supérieure à celle d'un smartphone et pourrait servir à l'affichage à même la peau d'applications portables. **H. J.**

SOURCE : ZHITAO ZHANG, UNIVERSITÉ STANFORD, ÉTATS-UNIS.



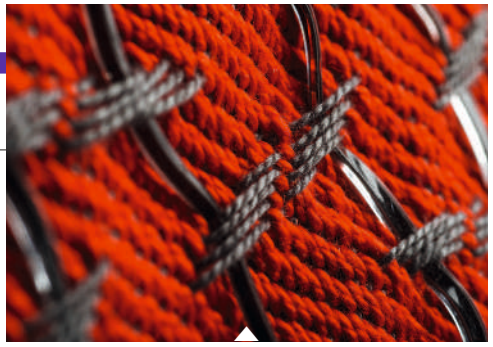
ZHITAO ZHANG, JIANCHENG LAI, BAO GROUP RESEARCH LAB

Le dispositif lumineux est flexible et extensible.

IL A DIT

« Le lien étroit qui existe entre la chimie de la vie sur Terre et celle dans l'Univers suggère que la détection de la vie [sur une exoplanète] n'est qu'une question de temps »

Alexander Wolszczan, codécouvreur de la première exoplanète autour d'un pulsar en 1992, après l'annonce de la Nasa en mars de la découverte de la 5000e exoplanète.



GREGHREN

Le fil transducteur intégré au textile permet d'amplifier les vibrations sonores.

Un tissu acoustique pour transférer le son

MATÉRIAUX Des ingénieurs ont décuplé les imperceptibles vibrations des fibres textiles sous l'effet du son en incorporant un fil transducteur pour fabriquer le premier tissu acoustique. Il capte les vibrations et les transmet à une enceinte qui restitue le son. L'ingénieux procédé pourrait aider les malentendants. **A. D.**

SOURCE : WEI YAN, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, CAMBRIDGE, ÉTATS-UNIS.

EN DEUX MOTS

AURORES La mission américaine Active Aurora va lancer deux fusées dans des aurores boréales en Alaska pour étudier les perturbations moléculaires à l'origine de ces phénomènes lumineux. **TOURISME** La Station spatiale internationale a accueilli la première mission entièrement privée, composée de trois hommes d'affaires et d'un ancien astronaute. **SATELLITE** Starlink, le service d'accès à Internet par satellite du milliardaire Elon Musk, a été privé de ses fréquences hertziennes en France après un recours devant le Conseil d'État.

Ces étoiles se transforment en accélérateurs de particules

Lors d'une explosion cosmique, les astrophysiciens estiment que les vitesses se rapprochent de celle de la lumière.

C'est une accélération record de particules cosmiques qu'une équipe d'astrophysiciens de la collaboration internationale HESS (High Energy Stereoscopic System) a pu enregistrer en direct du début à la fin. La scène décrite dans la revue *Science* se déroule dans la constellation d'Ophiuchus, où une naine blanche, dense et compacte, aspire l'atmosphère d'une géante rouge par sa force d'attraction. Or, tous les 15 à 20 ans, la pâle naine blanche devient subitement beaucoup plus lumineuse, formant alors une nova qui la rend visible à l'œil nu depuis la Terre. En scrutant le ciel durant plus d'un mois, les scientifiques ont pu établir que des noyaux d'atomes et des protons subissent une accélération les amenant très près de la vitesse de la lumière. **F. N.**

DESY/H.E.S.S. SCIENCE COMMUNICATION LAB

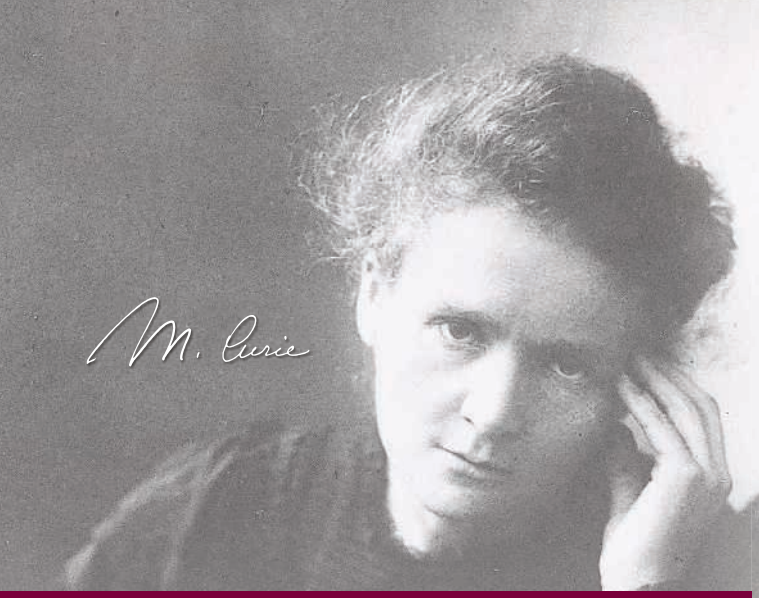
L'explosion de la naine blanche dans la constellation d'Ophiuchus (vue d'artiste).

STONY BROOK UNIVERSITY

Le prix Abel pour Denis Sullivan

MATHÉMATIQUES

L'Américain Dennis Sullivan a reçu le prix Abel 2022 pour ses vastes contributions à la topologie et à la théorie des systèmes dynamiques. Après John Milnor en 2011, c'est le second topologue à recevoir ce « Nobel des maths », décerné tous les ans par l'Académie norvégienne des sciences. H. J.



Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

institut Curie

ENSEMBLE, PRENONS
LE CANCER DE VITESSE

curie.fr

Pour tout renseignement contacter Catherine Ricatte - Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.
Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_|

Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

SA0522

GREG OAKLEY/NATUREPL/EBPHOTO

Le cassican flûteur, ou pie australienne, a montré ses capacités à collaborer et résoudre des problèmes.

Quand les pies se jouent des scientifiques

Un comportement inédit a été observé chez ces volatiles qui, après avoir été équipés de traceurs, les ont retirés en s'aidant mutuellement.

Six mois de travaux scientifiques réduits à zéro en moins de trois jours ! C'est le revers qu'a fait subir une bande de pies australiennes *(Gymnorhina tibicen)* aux chercheurs de l'université de la Sunshine Coast, en Australie. Ces derniers avaient mis au point un concept de harnais adapté aux oiseaux de petite et moyenne taille, équipé de capteurs GPS pesant moins de 1 gramme. Ils ont voulu tester ce dispositif sur ces passereaux appelés aussi cassicans flûteurs. *« Malgré les tests démontrant la résistance et la durabilité du harnais, les dispositifs ont été retirés quelques minutes à quelques heures après l'installation »*, expliquent les auteurs de l'étude publiée dans la revue *Australian Field Ornithology.*

Les oiseaux ont trouvé le point faible du dispositif

Celle-ci a impliqué cinq oiseaux progressivement habitués à venir se nourrir à une station d'alimentation, puis équipés des fameux harnais. Les chercheurs pensaient que ces pies reviendraient ensuite à la station, où un aimant libérerait l'appareil GPS sans qu'il soit nécessaire de les manipuler. Ce fermoir aimanté d'à peine 1 millimètre de long était le seul point faible du dispositif. Or, quelques dizaines de minutes après avoir équipé le dernier oiseau, les chercheurs ont observé une femelle adulte picorer le harnais d'un juvénile se tenant immobile, trouver le point faible et le couper avec son bec. D'autres pies ont ensuite effectuée la même opération, et trois jours plus tard le dernier oiseau était libéré à son tour. Pour les chercheurs, ce comportement démontre la capacité de ces oiseaux à collaborer et résoudre des problèmes, fournissant une preuve supplémentaire des facultés cognitives de cette espèce très sociale. ■ **S. R.**

La larve couronnée reine des fourmis

MYRMÉCOLOGIE À la fin de son stade larvaire, la reine *Monomorium triviale*, une espèce de fourmi ambrée originaire d'Asie, se pare de protubérances qui la distinguent des larves d'ouvrières jusqu'ici identiques. Une surprise observée au microscope électronique que les chercheurs peinent à expliquer. Il pourrait s'agir d'un signal avisant la colonie de prendre soin de cette larve au royal destin. **H. J.**

SOURCE : NAOTO IDOGAWA, UNIVERSITÉ DE KYOTO, JAPON.

IDOWAGA ET AL.

Encore au stade larvaire, cette fourmi accède au trône.

De l'éolien flottant en Méditerranée

ÉNERGIE Le gouvernement a annoncé en mars le lancement de deux parcs éoliens flottants en Méditerranée, l'un au large de Gruissan (Aude), l'autre en face de Fos-sur-Mer (Bouches-du-Rhône). Les éoliennes qui ne nécessitent pas d'être fixées au sol marin seront situées à 22 km au large. Les deux parcs couvrant 50 km² auront chacun une puissance de 250 mégawatts. Ils assureront 10 % de la consommation électrique cumulée des régions Occitanie et Provence-Alpes-Côte d'Azur. **L. C.**

bouygues TELECOM

BETC Bouygues Telecom – Société anonyme au capital de 819 698 624,76 € – Siège social : 37-39, rue Boissière – 75116 PARIS – 397 480 930 RCS PARIS.

On n'arrêtera jamais de faire tomber nos smartphones.

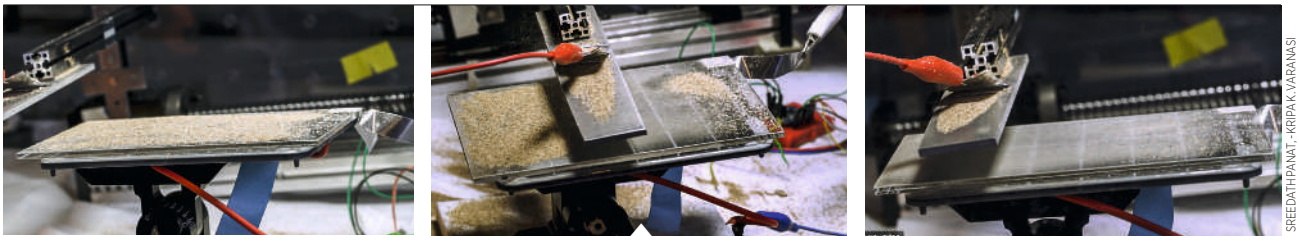
Bouygues Telecom vous aide à faire réparer votre smartphone pour le faire durer plus longtemps.
Tous nos clients forfait Sensation bénéficient de **30 % de remise sur la réparation express de leur smartphone.**

Nos conseillers vous accueillent dans **nos 500 boutiques.**

solutions smartphone durable

RÉPARÉ · REPRIS · RECONDITIONNÉ · RECYCLÉ

Réparation sous 1 à 5 jours ouvrés avec remise de 30 % valable deux fois par an jusqu'au 04/02/23 pour les clients Sensation (engagement 12 ou 24 mois) auprès de notre partenaire WeFix. Conditions sur bouyguestelecom.fr. Kit mains-libres recommandé.



SREEDATH PANAT, KRIPAK VARANASI

Sans toucher la surface, un balai chargé électriquement capture la poussière recouvrant la cellule photovoltaïque.

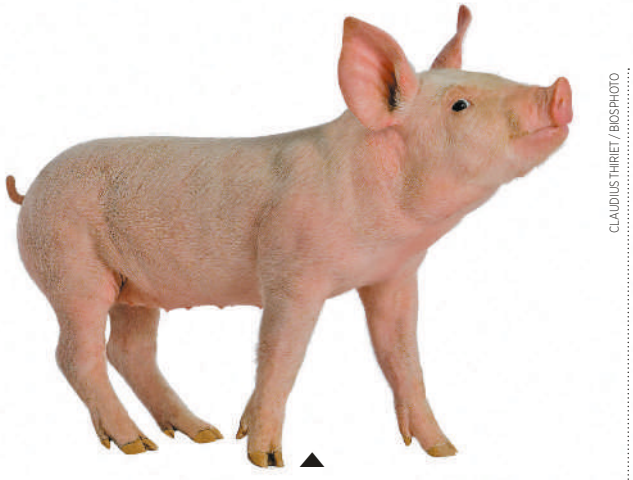
Des panneaux solaires toujours propres

Une équipe du MIT a développé un système électrostatique permettant le nettoyage sans eau.

Un dispositif de nettoyage des panneaux solaires fondé sur l'électrostatique a été mis au point par une équipe du Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, États-Unis). Souvent localisés dans des régions désertiques exposées au soleil mais aussi à la poussière, les plus grands parcs photovoltaïques mondiaux peuvent perdre jusqu'à 30 % de leur rendement s'ils ne sont pas régulièrement nettoyés. Pour se débarrasser de la poussière tout en économisant les besoins en eau, les ingénieurs ont équipé des panneaux d'un balai métallique chargé électriquement. En rasant la surface à quelques centimètres, celui-ci attire les poussières elles-mêmes préalablement chargées par une fine pellicule conductrice transparente recouvrant les panneaux. Ce dispositif novateur pourrait permettre l'économie de plus de 30 milliards de litres d'eau par an, l'équivalent de la consommation annuelle de 545 000 Français. **A. C.**

EN DEUX MOTS

BIODIVERSITÉ Les ours bruns se portent bien dans le massif pyrénéen où 70 individus ont été recensés en 2021, soit une hausse de 9 % selon le réseau français Ours brun. **MÉGAFEUX** Les incendies dévastateurs de l'été 2019-2020 en Australie ont provoqué une diminution de l'ozone durant des mois dans l'hémisphère Sud. **RÉCHAUFFEMENT** L'unité pilote de capture et stockage de CO_2 visant le « lessivage » des fumées industrielles a démarré sur le site sidérurgique d'ArcelorMittal à Dunkerque (Nord).



CLAUDIUS THIRIET / BIOSPHOTO

Comme l'humain, le suidé réagit émotionnellement aux airs entendus.

Les cochons sont sensibles à la musique

ÉTHOLOGIE Les cochons font la différence entre des musiques discordantes et harmonieuses. Lors d'une expérience en Colombie, les porcs soumis à des morceaux d'une durée de trois minutes réagissaient aux musiques agréables par des attitudes apaisées ou joueuses, et aux sons discordants de façon plus agressive. L'étude pourrait ouvrir la voie à la composition d'œuvres destinées aux élevages en bâtiment. **L. C.**

SOURCE : JULIANA ZAPATA CARDONA, UNIVERSITÉ D'ANTIOQUIA, COLOMBIE

37,5 °C L'excès de température record en Antarctique

CLIMAT Le 18 mars, le mercure a atteint -11,5 °C sur le dôme C en Antarctique, alors que la température oscille en principe autour de -49 °C. Jamais un tel écart avec les normales de saison n'avait été enregistré à cet endroit. Un record de chaleur qui serait à l'origine de l'effondrement de la plate-forme de glace de Conger, de la taille de la ville de New York, repérée par les satellites de la Nasa. **H. J.**

Les moustiques stériles, ça fonctionne

ENTOMOLOGIE Une expérience menée à La Réunion par l'IRD montre que six mois après le lâcher de 4 millions de moustiques mâles stériles, 50 % des œufs pondus par les femelles n'éclosent pas. Visant à enrayer les épidémies de dengue ou de chikungunya, cette stratégie consiste à disperser dans la nature des *Aedes* irradiés, capables de féconder des femelles sauvages qui pondront ensuite des œufs incapables d'éclore. **L. C.**

IRD - THIBAUT VERGOZ

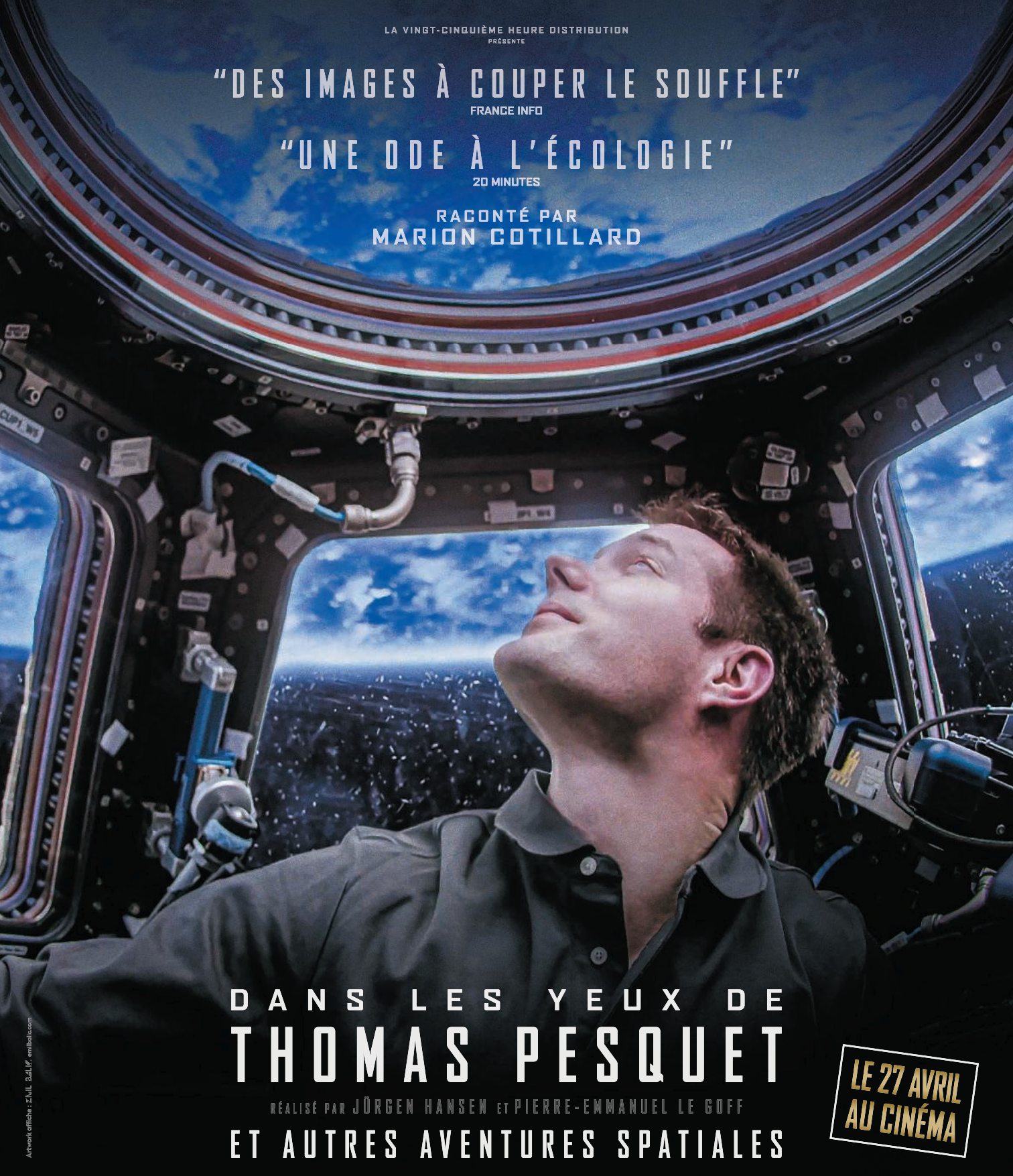
La moitié des œufs pondus par les femelles des moustiques lâchés n'ont pas éclos.

LA VINGT-CINQUIÈME HEURE DISTRIBUTION
PRÉSENTE

"DES IMAGES À COUPER LE SOUFFLE"
FRANCE INFO

"UNE ODE À L'ÉCOLOGIE"
20 MINUTES

RACONTÉ PAR
MARION COTILLARD



DANS LES YEUX DE THOMAS PESQUET

RÉALISÉ PAR JÜRGEN HANSEN ET PIERRE-EMMANUEL LE GOFF

ET AUTRES AVENTURES SPATIALES

LE 27 AVRIL AU CINÉMA

Artwork affiche : Emilie Balut - emilieballut.com

- 5 COURTS-MÉTRAGES À LA CARTE -

SIDERAL DE CARLOS SEGUNDO

GAGARINE DE FANNY LIATARD ET JÉRÉMY TROUILH

VOYAGE DANS LA LUNE DE GEORGES MÉLIÈS

JOHNNY EXPRESS DE WOO KYUNGMIN

LE GOÛT FRAMBOISE DE DAVID NOBLET

20 minutes · SCIENCES AVENIR La Recherche · AIR&COSMOS · cnes · ESPACE EXPLORATION · zéro de conduite .net · Bref Cinéma · NOMADE AVENTURE · FONDATION SAINT EXUPÉRY · Ciel & espace · esa · L'AGENCE DU COURT MÉTRAGE · Le Monde des ados

JAANUS JÄRVA /PHOTOSHOT /BIOSPHOTO

Les projectiles sont avalés par les oiseaux de proie (ici, un pygargue à queue blanche).

Les rapaces intoxiqués par les plombs de chasse

Une vaste étude européenne impute la surmortalité d'oiseaux charognards à l'ingestion de munitions des chasseurs.

Le nombre de rapaces victimes d'une intoxication au plomb dans les pays européens est lié à la densité de chasseurs, révèle une étude effectuée par une équipe germano-britannique. Les scientifiques se sont appuyés sur les analyses faites dans 13 pays européens sur plus de 3000 cadavres de 22 espèces différentes de rapaces, dont 7 % ont montré des concentrations mortelles en plomb. Il s'agissait le plus souvent d'oiseaux charognards tels que les vautours, mais aussi l'aigle royal ou à queue blanche, le busard commun ou encore l'autour des palombes. Au total, les auteurs ont calculé que 55 000 rapaces adultes manquaient à l'appel en Europe à cause des 14 000 tonnes de plomb dispersées chaque année par la chasse. L'Agence européenne des produits chimiques (ECHA) a proposé d'interdire d'ici à 2023 la grenaille de plomb dans le but de protéger les écosystèmes. **P. K.**

IL A DIT

« C'est un catalogue de la honte, répertoriant les promesses vides qui nous mettent résolument sur la voie rapide vers la catastrophe climatique »

António Guterres, secrétaire général de l'ONU, réagissant à la publication du 3e rapport du Giec sur le climat, qui donne trois ans à l'humanité pour réduire drastiquement ses gaz à effet de serre.

Une nouvelle espèce de poisson arc-en-ciel des profondeurs

YI-KAI TEA

« Cirrhilabrus finifenmaa » vivrait entre 40 et 70 mètres de profondeur au large des Maldives et du Sri Lanka.

ICHTYOLOGIE Ce joli poisson vivant au large des Maldives et du Sri Lanka vient d'être officiellement admis comme une nouvelle espèce. Longtemps pris pour la version adulte d'un autre poisson arc-en-ciel, *Cirrhilabrus finifenmaa* vit en réalité dans des eaux plus froides et moins lumineuses. Celui qui est aussi surnommé le « Napoléon à voiles roses » vivrait en effet entre 40 et 70 mètres de profondeur. **H. J.**

SOURCE : AHMED NAJEEB, INSTITUT DE RECHERCHE MARINE DE MALÉ, MALDIVES.

Les cétacés effrayés par les sonars des bateaux

ÉTHOLOGIE Les cétacés confondent le son émis par les sonars avec celui de leur principal prédateur, l'orque, alerte une étude européenne. Le globicéphale, les baleines à bec ou à bosse et le cachalot réduisent, voire cessent la chasse pour privilégier la fuite. Un tel stress peut compromettre leurs chances de survie à long terme, notamment dans l'océan Arctique où le trafic maritime commence à prendre de l'ampleur. **P. K.**

SOURCE : PATRICK MILLER, UNIVERSITÉ DE SAINT-ANDREWS, ROYAUME-UNI.

Les feuilles axiales (à droite) permettent aux grands arbres d'absorber 50 l d'eau en une heure.

La botte secrète du séquoia

BOTANIQUE Difficile à croire tant cet arbre est étudié, mais des botanistes viennent de remarquer que le séquoia à feuilles d'if *(Sequoia sempervirens)* a deux types de feuilles bien distincts. Si les feuilles périphériques sont en charge de la photosynthèse, celles dites axiales, tout juste découvertes, retiennent l'eau pour contrer un stress hydrique. Une botte secrète expliquant en partie le succès de ces arbres dans de nombreux environnements. **A.-S. T.**

SOURCE : ALANA CHIN, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE, DAVIS, ÉTATS-UNIS.

ALANA CHIN/UC DAVIS

RIVAGES
DU MONDE

Voguer. Échanger. Rêver

RCS Paris B 438 679 664 – 150 000 euros - Atout France IM 075 100 099 – Gettyimage.

OFFRE LECTEURS

-20%*

Sur votre croisière
à bord du World Explorer
avec le code **SA02**

Croisières

GRAND NORD

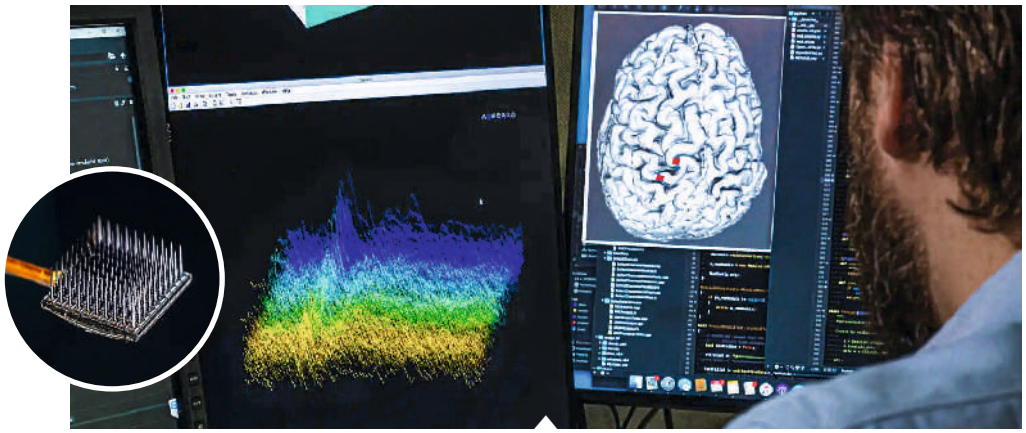
FJORDS DE NORVÈGE • DU 22 AU 29 MAI 2022 ET DU 29 MAI AU 5 JUIN 2022

CAP NORD, ÎLES LOFOTEN ET FJORDS • DU 16 AU 26 JUIN 2022

CROISIÈRE DE L'ISLANDE AU GROENLAND • DU 3 AU 15 AOÛT 2022

*Offre non rétroactive valable jusqu'au 10/07/2022 non cumulable avec d'autres réductions sauf avantage fidélité.

RÉSERVEZ VOTRE CROISIÈRE AU 01 83 96 85 03 OU SUR WWW.RIVAGESDUMONDE.FR



WYSS CENTER

Un système de « neurofeedback » et des microélectrodes (en médaillon) ont permis au patient de s'exprimer.

Un implant cérébral libère un patient de son enfermement

Un homme complètement paralysé a appris à communiquer en activant des électrodes par sa seule volonté.

Un trentenaire entièrement paralysé par la maladie de Charcot a pu s'exprimer au moyen d'électrodes implantées dans son cerveau, rapporte une étude dans *Nature Communications*. L'homme souffre d'un syndrome d'enfermement ou *Locked-in-Syndrome*, un état dans lequel les patients entendent et comprennent tout sans pouvoir ni bouger ni parler. Le plus souvent, ils communiquent au moyen de systèmes informatiques commandés par le mouvement oculaire. Mais pour cet homme de 34 ans, c'est impossible car même ses yeux sont paralysés. Aussi les scientifiques du centre Wyss à Genève (Suisse) et de l'université de Tubingue (Allemagne) lui ont implanté deux électrodes dans des zones cérébrales impliquées dans le contrôle moteur. Il a dû ensuite apprendre à les activer par sa seule volonté.

Un futur système sans fil entièrement implantable

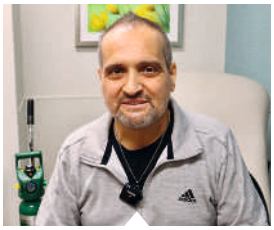
Pour l'aider, les scientifiques ont installé un système de *neurofeedback* qui l'informe au moyen d'un signal sonore s'il a réussi ou non à activer les électrodes. Il a mis 86 jours à y parvenir. Après une centaine de jours d'entraînement, l'homme a réussi à écrire au rythme moyen d'un caractère par minute.

Les premiers messages retranscrits par les soignants ont fait part de nécessités physiques comme *« tête toujours droite »*, tandis que les derniers sont des mots personnels adressés à son fils de 4 ans. *« Notre principale réalisation, c'est la démonstration que ces patients ne sont ni morts ni inconscients mais heureux d'être en vie et conscients comme vous et moi »*, se réjouit un des chercheurs. Nommé Ability, un système sans fil entièrement implantable, inspiré de cette expérience, est en cours de mise au point. Il a l'ambition de décoder la parole en temps réel, couplé à des systèmes vocaux pour une communication plus naturelle. ■ **C. G.**

Une double greffe pulmonaire pour cancer terminal

CHIRURGIE **Albert Khoury, un Américain de 54 ans, a été sauvé d'un cancer du poumon au stade terminal grâce à une double greffe reçue il y a sept mois. Un cas unique selon les chirurgiens tant les greffons sont rares et les risques de rechute importants à ce stade. S'il a pu en bénéficier, c'est que sa tumeur était restée localisée aux poumons, sans métastases.** **H. J.**

SOURCE : ANKIT BHARAT, HÔPITAL NORTHWESTERN MEDICINE DE CHICAGO, ÉTATS-UNIS.



AFP

Albert Khoury a reçu la double transplantation en septembre 2021.

LE MOT DU MOIS

Sonogénétique

Pour la première fois, des chercheurs ont pu contrôler des cellules de mammifères avec… des ondes sonores ! Des ultrasons ont en effet permis d'agir sur l'expression génétique de cellules humaines *in vitro* et dans le cerveau de souris *in vivo*. Là où l'optogénétique repose sur des protéines sensibles à la lumière, les chercheurs ont identifié une protéine sensible au son. La technique permettrait de stimuler des cellules profondément dans l'organisme. **H. J.**

SOURCE : MARC DUKE, SALK INSTITUTE, ÉTATS-UNIS.

FAISONS AMANDE HONORABLE, C'EST TROP BON

Suggestion de présentation

100% végétal

C'EST BON ÇA !

Et ce qui est vraiment trop bon c'est que nos amandes s'hydratent majoritairement à l'eau de pluie et poussent sous le soleil de Méditerranée. On le sait, on les a grillées

D.P.F.F. 672 039 971 R.C.S Nanterre

Pour votre santé, évitez de grignoter entre les repas. www.mangerbouger.fr

YALE UNIVERSITY

Ces trois patients (dont on voit le crâne avant et après) ont pris le médicament pendant 36 mois.

Un traitement efficace contre la chute des cheveux

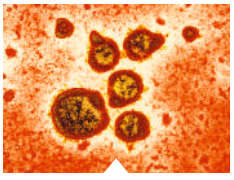
Il permet de rendre leur chevelure à des patients atteints de pelade.

Le baricitinib, un médicament utilisé contre la polyarthrite rhumatoïde, s'est avéré efficace pour rendre leur chevelure à des patients atteints de pelade. Aussi appelée *alopecia areata*, cette maladie auto-immune entraîne la perte soudaine de plaques entières de cheveux en raison de l'attaque des follicules pileux par des cellules immunitaires déréglées. Dans cet essai clinique de phase 3 dont les résultats sont publiés par le *New England Journal of Medicine*, l'équipe de l'université Yale (États-Unis) a observé qu'un tiers des 1200 patients inclus dans leur étude avait répondu de façon spectaculaire au traitement, alors que tous avaient perdu au moins la moitié de leur chevelure et beaucoup n'en avaient plus un seul. Les chercheurs expliquent que le baricitinib contrecarre la maladie en perturbant la communication des cellules immunitaires impliquées dans l'attaque des follicules pileux, comme il le fait déjà contre les maladies articulaires. **H. J.**

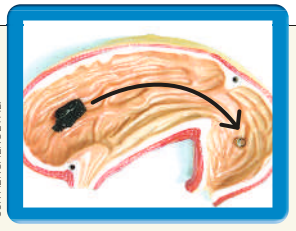
Un vaccin maternel contre la bronchiolite du bébé

INFECTIOLOGIE Donné à des femmes enceintes, un vaccin expérimental contre le virus respiratoire syncytial (VRS), responsable de la bronchiolite, aurait permis l'immunisation de leur bébé au moins sur les 3 premiers mois de vie. La prescription d'antibiotiques contre les surinfections facilitées par le VRS a chuté de 13 % chez ces enfants. **P. K.**

SOURCE : J. LEWNARD, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE À BERKELEY, ÉTATS-UNIS.


SPL/PHANIE

Le virus VRS, responsable de la bronchiolite.


SUN MENGMENG ET AL.

À VOIR SUR LE NET

Un robot visqueux pour explorer le corps humain

ROBOTIQUE D'aspect peu engageant, ce robot mou a une vocation thérapeutique. Fait d'un gel d'alcool polyvinyle, de borax et de particules magnétiques dans une enveloppe de silicone, il est piloté de l'extérieur du corps par des aimants. Son élasticité lui permettrait de se glisser dans des zones difficiles d'accès pour récupérer des objets avalés par accident *(photo)*. **A. D.**

SOURCE : LI ZHANG, UNIVERSITÉ DE HONG KONG, CHINE.

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Une souris est née sans père

REPRODUCTION Pour la première fois, un souriceau né à partir d'un ovule non fécondé par des gamètes mâles a réussi à vivre jusqu'à l'âge adulte et à se reproduire. Une parthénogenèse courante chez certains végétaux et reptiles, mais encore jamais vue chez les mammifères. Sur les 227 ovules génétiquement modifiés pour l'expérience, seuls trois souriceaux sont nés, et un seul a atteint l'âge adulte. L'expérience visait à comprendre les mécanismes prédisposant à des maladies génétiques. **C. L.**

YANCHANG WEI

Ce rongeur (ici avec ses petits) est né à partir d'un ovule non fécondé.

SOURCE : YANCHANG WEI, UNIVERSITÉ JIAO-TONG DE SHANGHAI, CHINE.

Un gène pourrait permettre de prédire le rejet de greffe

GÉNÉTIQUE Des chercheurs strasbourgeois viennent de démontrer que le gène MICA permet de prédire le succès ou l'échec d'une greffe rénale. Lorsque receveur et donneur présentent une version différente du gène, la survie du greffon est diminuée. Des travaux qui restent à confirmer avant de généraliser le séquençage de MICA afin de mieux évaluer la compatibilité de l'organe avec le receveur et ainsi mieux prévenir le rejet du greffon. **S. R.-M.**

SOURCE : RAPHAËL CARAPITO, UNIVERSITÉ DE STRASBOURG, FRANCE.

Les microplastiques coulent aussi dans nos veines

POLLUTION Présentes partout sur Terre, les microparticules de plastique avaient déjà été retrouvées dans l'organisme humain, mais c'est la première fois qu'on les détecte dans le sang. En moyenne, 1,6 microgramme par millilitre a été retrouvé sur 17 des 22 individus testés, soit l'équivalent d'une petite cuillère pour trois baignoires. On ignore encore les effets physiologiques de cette présence. **L. C.**

Les effets physiologiques des microplastiques dans le sang ne sont pas encore connus.

GETTY IMAGES

SOURCE : H. LESLIE, UNIV. LIBRE D'AMSTERDAM, PAYS-BAS.

ELLE A DIT

« La connaissance de la séquence complète du génome humain révolutionnera la façon dont les scientifiques envisagent les variations génomiques humaines, les maladies et l'évolution »

Karen Miga, université de Californie à Santa Cruz (États-Unis), coauteure des travaux ayant permis de séquencer les 8 % de génome humain qui restaient à déchiffrer pour obtenir la toute première séquence complète.

SOURCE : SERGEY NURK, INSTITUT NATIONAL DU GÉNOME HUMAIN, ÉTATS-UNIS.

L'autisme dépisté dès l'âge de 1 an

PSYCHIATRIE Cinq critères de communication sociale mesurés à l'âge de 12, 18 et 24 mois permettent de savoir si un enfant est atteint d'autisme dans plus de huit cas sur dix. Ce score dépasse neuf cas sur dix si le dépistage est renouvelé à 42 mois selon l'étude australienne, qui a porté sur plus de 13 000 enfants. Le test, appelé SACS-R, peut être effectué par des puéricultrices formées. **P. K.**

SOURCE : JOSÉPHINE BARBARO, UNIVERSITÉ DE LA TROBE, AUSTRALIE.

GETTY IMAGES

Le diagnostic a été efficace pour huit bébés sur dix.

www.lesproduitsdumois.com

FADIAMONE, VOTRE DUO NATUREL POUR UNE MÉNOPAUSE SEREINE

Complément Alimentaire : Formule 4 en 1
✔ La **vitamine D3** dosée à 800UI/jour aide au maintien du capital osseux et de l'immunité.
✔ L'**extrait de Pollen** limite les bouffées de chaleur.
✔ Le Magnésium aide à réduire la fatigue et stress.
✔ Les **Omega 3** de haute pureté contribuent à une fonction cardiaque normale. Sans effet hormonal.
En complément, les incontournables crèmes Fadiamone (Jour & Nuit).
■ Laboratoire Novomedis En pharmacie. Fabriqué en France - www.novomedis.fr

RETROUVER BIEN-ÊTRE ET SÉRÉNITÉ

Zenytud est une formule à la fois puissante et naturelle, idéale en situation de mal-être et notamment de burn-out.

Elle associe des extraits végétaux concentrés (Rhodiola, Safran) à Lactium® (un ingrédient breveté) ainsi que des vitamines (B3, B6, B9) et minéraux essentiels (Magnésium).

Ensemble, ils agissent sur les neurotransmetteurs les plus importants dans les troubles anxieux (GABA, sérotonine, dopamine) tout en **favorisant des fonctions psychologiques normales, une réduction de la fatigue et une humeur positive.**

Sans effet indésirable ni accoutumance.

■ En pharmacie - Boîte de 60 gélules végétales. ACL 6024255
Plus d'infos au 01 83 96 83 01 (tarif local) - zenytud.com
Formule très concentrée, demandez un avis médical si vous prenez des médicaments.

NOUVEAU : Reflux, sécrétions, irritations altèrent votre qualité de vie. MUCODISTIM, ENFIN UNE SOLUTION !

Raclements persistants dans la gorge, la Lithocétine® et le GABA agissent sur le pH de l'acidité gastrique et sur la réduction du relâchement du sphincter, permettant ainsi de contribuer à l'élimination des mucosités tout en luttant contre le reflux, l'Inflammation et l'irritation. La quercétine, pour sa part, aide à combattre le phénomène allergique. En complément, la Valériane, l'éleuthérocoque, et le magnésium agissent sur le stress et la tension musculaire.
Mucodistim va vous soulager !
A découvrir sur www.audistimpharma.com, en pharmacie et au tel. 05 56 69 13 84

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE
Pour paraître dans cette rubrique, R'Médias 01 46 48 85 41 - photos D.R.

Un très rare sarcophage sous Notre-Dame

Daté du XIVe siècle, il a été découvert sous une dalle à l'aplomb de la flèche de la cathédrale parisienne détruite lors de l'incendie de 2019.

PATRICK ZACHMANN/MAGNUM PHOTOS

D'aspect anthropomorphe, le sacorphage en plomb pourrait être celui d'un haut dignitaire de l'Église.

Tout juste trois ans après le terrible incendie qui a ravagé la cathédrale Notre-Dame de Paris le 15 avril 2019, les fouilles engagées par l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap) avant la reconstruction de la flèche de l'édifice ont mis au jour plusieurs sépultures dont un très rare sarcophage anthropomorphe en plomb datant probablement du XIVe siècle. Si la cathédrale s'est faite le refuge de nombreuses tombes depuis sa construction au XIIe siècle, c'est le premier du genre à être retrouvé intégralement conservé. Mis au jour sous une dalle empierrée au niveau de la flèche, il pourrait être celui *« d'un haut dignitaire »*, selon le communiqué du ministère de la Culture qui a révélé la découverte. La première analyse du mobilier présent dans le niveau de remblais le surmontant pourrait conduire à dater cette inhumation au plus tard au XIVe siècle.

Des restes précieux du premier jubé mis au jour

Mais les sous-sols de la cathédrale recèlent bien d'autres trésors historiques, comme cette fosse *« dans laquelle ont été enfouis des éléments sculptés polychromes identifiés comme appartenant à l'ancien jubé en pierre de Notre-Dame »*. Le jubé était une large structure séparant à l'époque le chœur liturgique de la nef, qui servait de tribune pour les prêches avant la généralisation de la chaire. Celui-ci a été construit vers 1230 avant d'être détruit au début du XVIIIe siècle. Lors des travaux d'édification de la flèche au milieu du XIXe siècle, l'architecte Eugène Viollet-le-Duc avait retrouvé d'autres fragments appartenant à ce jubé, lesquels sont aujourd'hui exposés au musée du Louvre. *« Il s'agit donc d'une découverte du plus grand intérêt, susceptible d'apporter des données nouvelles sur ce jubé et sur la qualité de son décor peint »*, a précisé le ministère de la Culture. **H. J.**

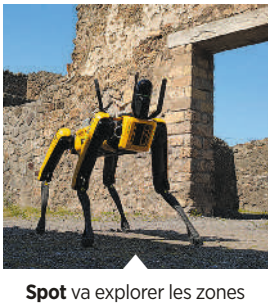
IL A DIT

« Les mammifères qui ont pris la place des dinosaures avaient des capacités intellectuelles limitées. Ce n'est que des millions d'années plus tard que des espèces ont développé des cerveaux plus gros »

Steve Brusatte, de l'université d'Édimbourg (Royaume-Uni), auteur d'une étude montrant qu'après l'extinction des dinosaures, la priorité des petits mammifères restants était la prise de masse musculaire.

Un chien-robot à la découverte de Pompéi

ARCHÉOLOGIE Spot, le robot quadrupède développé par la société Boston Dynamics, a été déployé sur le site de Pompéi (Italie). Sa mission ? Explorer les vestiges les plus dangereux de la ville romaine ravagée en l'an 79 par le Vésuve, en particulier les tunnels creusés par les pilleurs au fil du temps, trop fragiles pour que les archéologues s'y risquent. **H. J.**



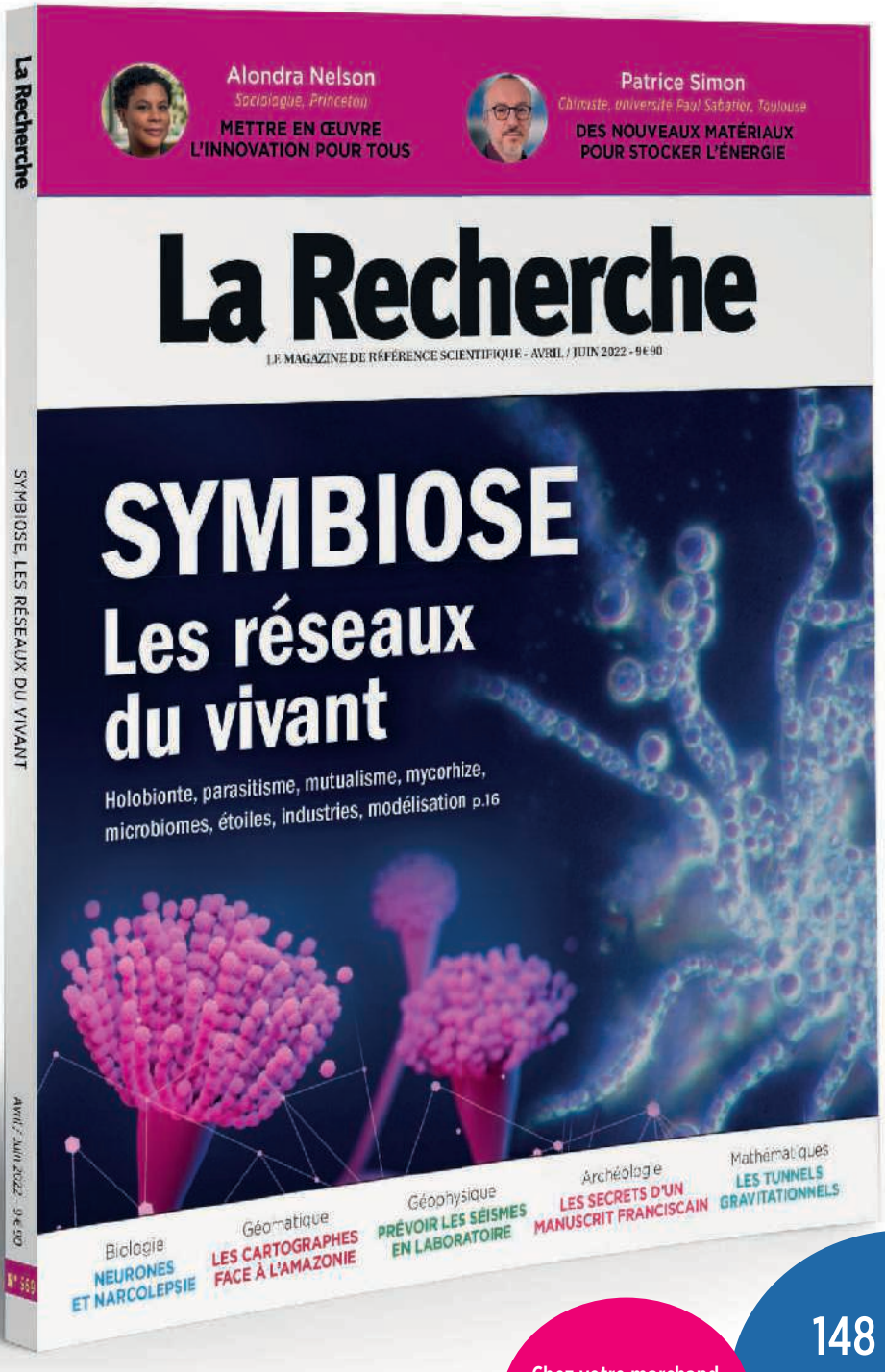
ABACAPRESS.COM

Spot va explorer les zones difficiles d'accès pour les archéologues.

32 SCIENTIFIQUES
PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE



Chez votre marchand de journaux et chez votre libraire

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

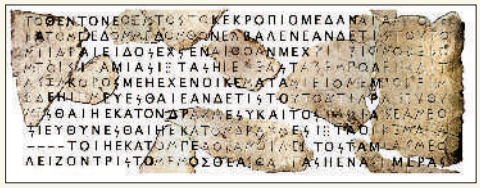
Au Sahel, Agadez conserve son patrimoine en 3D

Un programme a permis la numérisation de 15 bâtiments prestigieux de la cité du XVe siècle, ainsi que de sa célèbre Grande Mosquée.

ICONEM, ALIPH

Le minaret de 27 m de haut de la Grande Mosquée et le centre historique d'Agadez (Niger) ont été reconstruits en 3D.

Depuis 2020, un projet de conservation de la vieille ville d'Agadez, au Niger, a débuté sous les auspices de la société Iconem et de la Fondation Aliph, deux organismes connus pour leurs contributions à la conservation des sites du patrimoine mondial en danger. Le programme a pour but de procéder au relevé complet en 3D du cœur historique de la cité sahélienne. Ancien carrefour caravanier reliant l'Afrique du Nord à l'Afrique subsaharienne, la « perle du Sahel » a vu son patrimoine se dégrader. Des trésors d'architecture sont en effet menacés par le changement climatique et l'instabilité sécuritaire que connaît le Sahel. Des campagnes de relevés photogrammétriques ont ainsi permis l'enregistrement en 3D de 15 bâtiments prestigieux de la cité du XVe siècle, ainsi que de sa célèbre Grande Mosquée et son minaret de 27 mètres, le plus haut en terre crue de toute l'Afrique de l'Ouest. **B. A.**



YANNIS ASSAEL ET AL

Une IA reconstitue d'anciens textes grecs

ÉPIGRAPHIE Pour aider les chercheurs à lire les inscriptions antiques effacées par le temps, des spécialistes en intelligence artificielle (IA) ont créé Ithaca, un outil de traitement automatique destiné à combler les « trous ». Cet outil a atteint une précision de 62 % pour recouvrer des caractères manquants dans des écrits grecs du Ve siècle avant J.-C. *(photo)*. **B. A.**

SOURCE : YANIS ASSAEL, DEEPMIND, ROYAUME-UNI

Les eaux froides donnaient du poids au mégalodon

PALÉONTOLOGIE Les plus gros des mégalodons, ces requins gigantesques disparus il y a 3 millions d'années, vivaient sans doute en eau froide. Une vaste revue de dents retrouvées indique en effet que les plus grosses proviennent de latitudes plus élevées et plus fraîches, où les mâles pouvaient atteindre 15 m de long. Les dents plus petites viennent des zones chaudes équatoriales où la longueur des grands mâles ne devait pas dépasser 10 m. **J. I.**

BRUNO BOURGEOIS

La taille des requins dépendait de la température de l'eau.

SOURCE : K. SHIMADA, UNIV. DEPAUL, ÉTATS-UNIS.

Un « neuro-chirurgien » pré-inca exhumé

ARCHÉOLOGIE **Dans le temple mausolée Las Ventanas, au nord de Lima (Pérou), des chercheurs ont mis au jour les restes d'un personnage inhumé il y a plus de 1000 ans avec ses instruments de chirurgien. Couteaux à lame semi-circulaire, poinçons et aiguilles suggèrent qu'il était spécialiste en trépanation crânienne.** **H. J.**

SOURCE : CARLOS ELERA, MUSÉE NATIONAL DE LA CULTURE SICÁN, PÉROU

IVPP

Squelette fossile de la chouette « Miosurnia diurna » découverte en Chine.

La chouette qui vivait le jour

PALÉONTOLOGIE À 2000 m d'altitude, dans le bassin de Linxia, en Chine, *Miosurnia diurna* battait des ailes sous le soleil, il y a 6 millions d'années. Son fossile, retrouvé avec un crâne bien conservé, a permis d'examiner les détails des yeux et de reconstruire l'anneau scléral, composé de 16 petits os, qui entoure la pupille et l'iris chez les oiseaux. Sa dimension indique que cette chouette était active en journée. **J. I.**

SOURCE : ZHIHENG LI, ACADÉMIE DES SCIENCES À PÉKIN, CHINE.

65

Le nombre de tombes royales oubliées depuis les âges obscurs britanniques

ARCHÉOLOGIE Spécialiste des « âges obscurs » correspondant aux Ve et VIe siècles au Royaume-Uni, l'archéologue Ken Dark avance que 65 sépultures jusqu'ici ignorées par les scientifiques seraient à attribuer aux plus grands rois (et à leurs familles) de cette période mystérieuse de l'histoire, dans laquelle s'inscrit la légende du roi Arthur. **M. B.**

SOURCE : KEN DARK, UNIVERSITÉ DE READING, ROYAUME-UNI

AKG IMAGES

La carte, réalisée sur un parchemin de 2 m de diamètre, est datée de 1450.

L'incroyable planisphère de Fra Mauro numérisé

CARTOGRAPHIE L'une des œuvres les plus importantes de l'histoire de la cartographie, le planisphère réalisé en 1450 par le moine italien Fra Mauro, est désormais consultable sur un site mis en ligne par le musée Galilée de Florence. Réalisée sur un parchemin de deux mètres de diamètre, la carte gorgée de détails peut être explorée en haute résolution. **H. J.**
sciav.fr/903mauro

CHINE NOUVELLE/SIPA

Dans un des caveaux, un sarcophage en calcaire et des décorations murales ont été mis au jour sur le site de Saqqarah.

Des sépultures égyptiennes inédites abritent des sarcophages

ÉGYPTOLOGIE Les autorités égyptiennes ont annoncé la découverte de cinq sépultures antiques de hauts dignitaires datant de la VIe ou VIIe dynastie (environ 2200 ans avant J.-C.) sur le site de Saqqarah. Les fouilles ont notamment mis au jour un sarcophage en calcaire et des décorations colorées représentant des scènes funéraires. **H. J.**

LYDIE LECARPENTIER/REA - LALLENSACK AND FALKINGHAM 2022 - AFP -

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

ÉCOLOGIE

Vers une chimie plus verte

Considérée comme très polluante, la chimie est confrontée à un changement de paradigme pour adapter ses pratiques à la transition écologique. Enquête auprès des scientifiques qui mesurent l'empreinte carbone des laboratoires et explorent les pistes pour une chimie plus verte. À lire sur le site de *La Recherche*. https://bit.ly/903chimie

CLIMAT

De l'urgence climatique aux solutions techniques

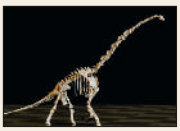
Le troisième rapport sur l'atténuation des émissions de CO_2 du Giec souligne l'urgence à sortir des énergies fossiles en rappelant que tous les outils techniques sont désormais à disposition pour relever le défi. sciav.fr/903giec

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

La marche des sauropodes décryptée



Quelles foulées avaient les diplodocus, brachiosaures ou titanosaures ? De nouvelles modélisations vidéo précisent leur démarche.
sciav.fr/903saurop

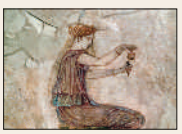
5 minutes

La planète Mars sort de son silence

Écoutez l'étonnant paysage acoustique de la planète Rouge, enregistré par le rover Perseverance.
sciav.fr/903sonars

10 minutes

Retrouver les odeurs des mondes anciens



Barbara Huber, de l'Institut Max-Planck en Allemagne, décrit comment sont reconstitués les environnements olfactifs de nos ancêtres.
sciav.fr/903odeurs

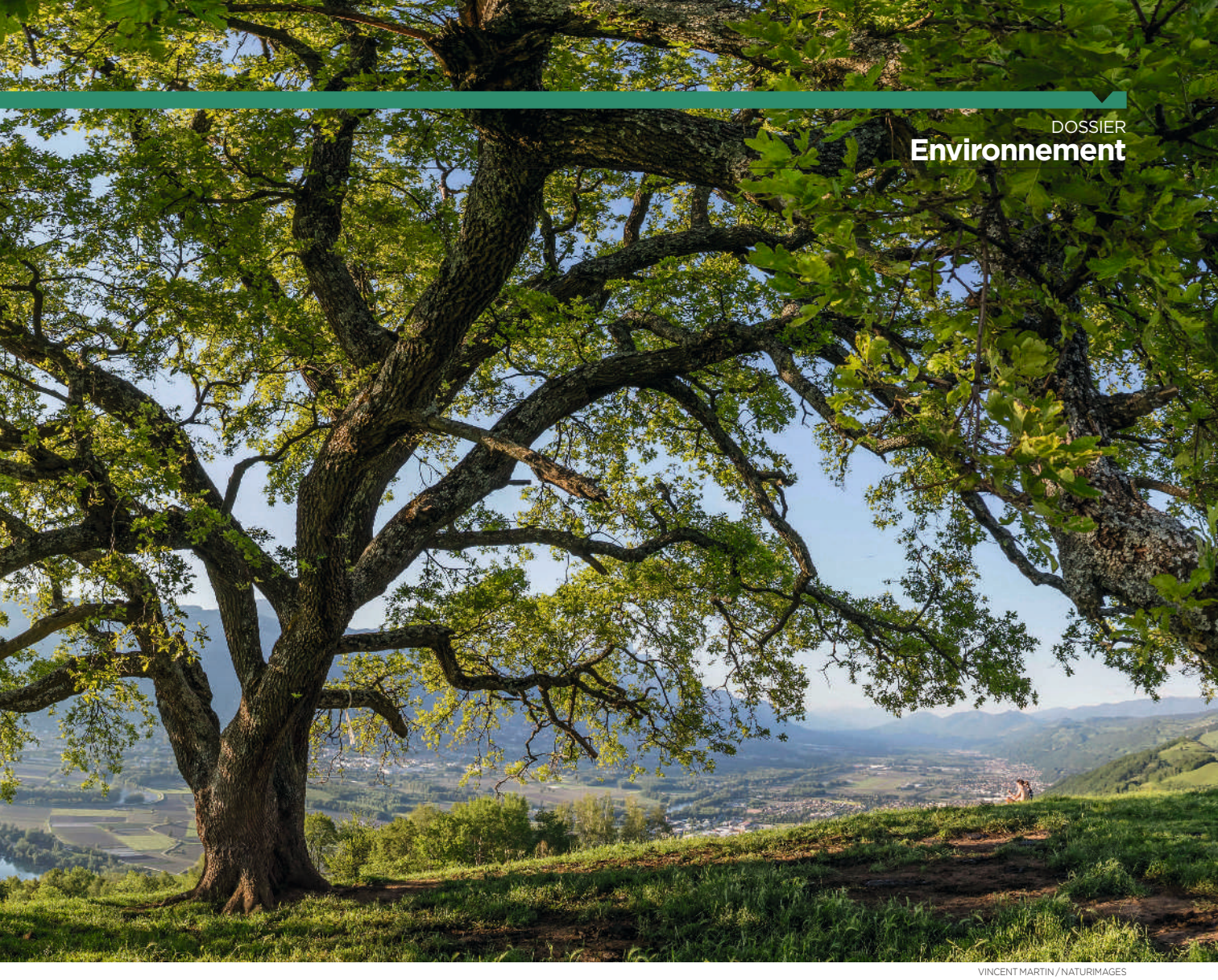
Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

Ce chêne situé à Venon (Isère), labellisé « arbre remarquable de France », est âgé d'environ 300 ans.

Les arbres

Gardiens de la Terre

Dossier réalisé par
Rachel Mulot et Sylvie Rouat
avec Andreina De Bei



VINCENT MARTIN / NATURIMAGES

Ce sont des super-héros mésestimés, formant à la fois le bouclier et le socle de la Terre et de ses habitants. Les arbres ont été outrageusement exploités au mépris de leur complexité et de notre intérêt. Des scientifiques plaident aujourd'hui pour former une nouvelle alliance avec ces gardiens des villes et de la planète.

ÉTAT DES LIEUX
Un écosystème aux multiples bienfaits
p. 34

ÉCOLOGIE
De puissants alliés pour réguler le climat
p. 36

AGRONOMIE
Un riche partenariat avec les sols
p. 41

VILLES
Le bouclier des zones urbaines
p. 43

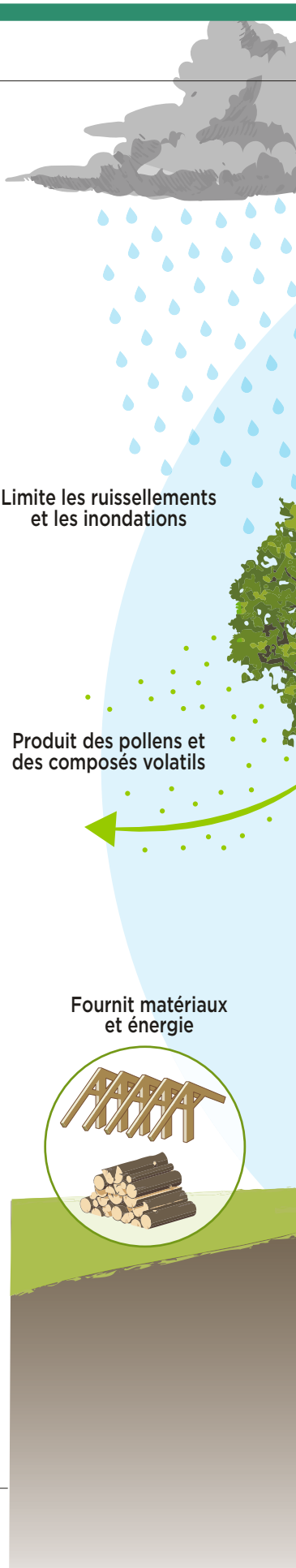
Un écosystème aux multiples bienfaits

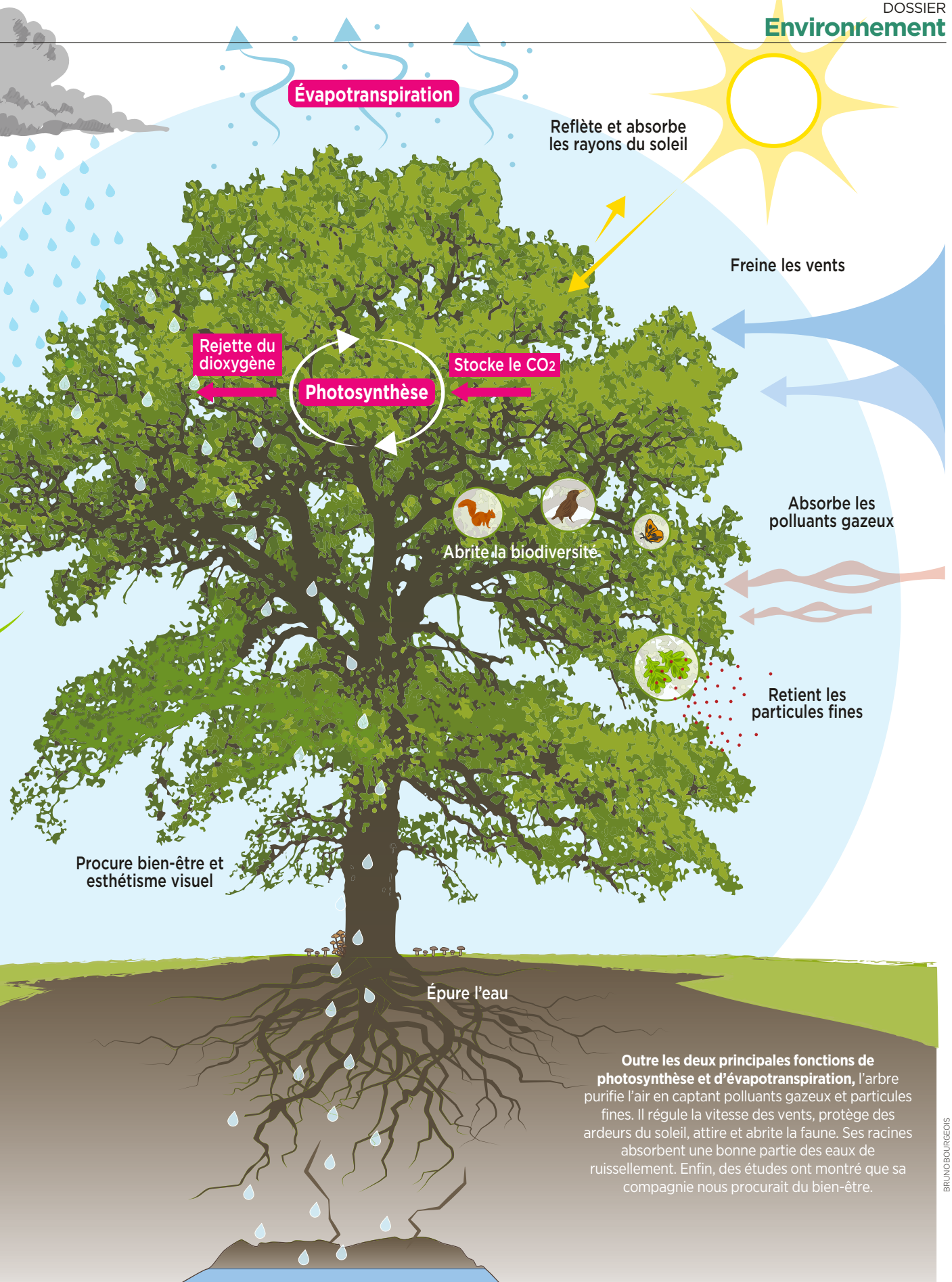
Le nombre de services rendus par les arbres à la planète et à ses habitants dont les humains est aussi étendu que négligé. Radiographie de ces gardiens sans lesquels nous limiterions nos chances de survie.

Il y a aujourd'hui sur Terre environ 3000 milliards d'arbres (1) pour 7,87 milliards d'habitants. Les premiers protègent les seconds des deux plus grandes menaces environnementales du XXIe siècle selon l'ONU : le changement climatique et la pollution de l'air. Les arbres ne sont pas seulement des éponges à gaz à effet de serre : des scientifiques viennent de découvrir que leur ombrage et leur évapotranspiration refroidissent de surcroît la température moyenne planétaire d'un précieux demi-degré *(lire p. 36)*. Ces producteurs d'oxygène sont en outre de bons épurateurs de polluants. Mais ce ne sont pas leurs seuls effets bénéfiques : les arbres filtrent 75 % de l'eau potable mondiale (2), atténuent les impacts des tempêtes, inondations et ruissellements. Ils abritent la biodiversité, notamment les pollinisateurs dont dépendent 35 % de la production agricole mondiale (3). Avec leurs sommets filtrant les rayons ultraviolets et leurs racines grouillantes de bactéries et de champignons, ils limitent l'érosion des sols, qu'ils fixent tout en les nourrissant de nutriments *(lire p. 41)*. Ils fournissent des molécules médicamenteuses (le saule a donné l'aspirine, l'if des remèdes contre le cancer), mais aussi des environnements esthétiques indispensables à notre santé mentale.

Malheureusement, nous avons longtemps mal compris l'étendue de leurs potentiels et besoins, en *« les rasant pour nous fournir en bois d'œuvre et d'énergie ou implanter des cultures jugées plus productives »*, regrette l'ingénieur forestier allemand Peter Wolheben, auteur de best-sellers sur les secrets des arbres *(lire aussi p. 90)*. Plus question aujourd'hui de planter n'importe quels arbres, n'importe où et n'importe comment, au prétexte de compenser la déforestation, qui supprimerait 15 milliards d'entre eux chaque année (1). *« Il est vital de replanter des forêts diversifiées et résistantes aux conditions climatiques futures »*, explique Francis Martin, de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae). Certains programmes visant à réguler nos émissions de CO_2 sont en effet désastreux *(lire p. 36)*. Arborer les villes se révèle également délicat, montrent les travaux à Houston (États-Unis) ou à Metz (Moselle) *(lire p 43)*. *« Les arbres peuvent engendrer des coûts environnementaux et monétaires »*, avertit David Nowak, du Département de l'agriculture des États-Unis, notamment parce que, quand les espèces sont mal choisies, ils peuvent émettre des pollens allergisants et des composés organiques volatils, mais aussi se montrer invasifs. *« L'arbre est un être vivant complexe, il ne se domestique pas bêtement pour rendre des services à court terme, il se respecte et se comprend »*, soutient le botaniste Francis Hallé. Le seul moyen de nouer une alliance durable avec ces gardiens hors du commun passe par un travail de terrain, de laboratoire et de pédagogie qui prenne mieux en compte leurs spécificités, et par le choix de nouvelles espèces bien adaptées. ■ **R. M.**

(1) Université de Yale, États-Unis, 2015 ; (2) 6e Forum mondial de l'eau, 2012 ; (3) FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture).





Outre les deux principales fonctions de photosynthèse et d'évapotranspiration, l'arbre purifie l'air en captant polluants gazeux et particules fines. Il régule la vitesse des vents, protège des ardeurs du soleil, attire et abrite la faune. Ses racines absorbent une bonne partie des eaux de ruissellement. Enfin, des études ont montré que sa compagnie nous procurait du bien-être.

BRUNOBOURGEOIS

De puissants alliés pour réguler le climat

Les forêts et leurs arbres jouent un rôle plus important et plus complexe dans la lutte contre la crise climatique qu'on ne le pensait. Pour préserver les bienfaits de ces gardiens de la planète, il faut substituer à la logique des plantations massives celle d'une reforestation avisée.

C'est un chêne majestueux de 40 m de haut, doté d'un tronc de 1,60 m de diamètre. *« À lui seul, il a pu constituer par la photosynthèse, tout au long de sa vie, un stock de 5000 kg à 7500 kg de CO_2* [dioxyde de carbone] », estime Catherine Lenne, chercheuse en biologie végétale à l'université Blaise-Pascal de Clermont-Ferrand. S'il est coupé pour servir de poutre dans une cathédrale, il continuera à séquestrer ce carbone pendant des siècles, mais s'il est brûlé, comme lors de l'incendie de Notre-Dame de Paris, il relarguera autant de gaz à effet de serre dans l'atmosphère… Puits naturels du carbone émis par les activités humaines, les arbres ont une fonction essentielle dans la régulation du climat. La planète en recèlerait 3000 à 3040 milliards, selon une estimation de l'université Yale (États-Unis). Près de la moitié d'entre eux, soit 1300 milliards, poussent dans les forêts tropicales et subtropicales, 740 milliards dans les régions boréales et 660 milliards dans les régions tempérées, comme la France ou la Suisse. Les 11 % restants se développent dans de vastes étendues de prairie ou de toundra, des mangroves et même des déserts.

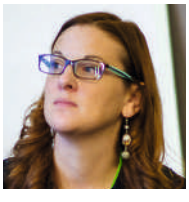
Au cours des douze mille ans écoulés depuis que l'agriculture a commencé à se répandre dans le monde, le nombre d'arbres sur notre planète aurait diminué de moitié. Aujourd'hui la forêt regagne du terrain, principalement dans l'hémisphère Nord. En France, elle occuperait ainsi 17 millions d'hectares contre 7 millions il y a seulement deux cents ans, selon l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). Et elle absorberait par an 13 % de nos émissions de gaz à effet de serre.

Au niveau planétaire, combien de carbone séquestrent ces gardiens du climat ? Une bataille de chiffres s'est engagée depuis quelques années entre les scientifiques pour l'évaluer. Les arbres compenseraient entre 20 % et 29 % de nos émissions. Selon l'étude la plus récente, publiée en janvier 2021 dans *Nature Climate Change* par l'Institut des ressources mondiales (WRI), *« les forêts captent chaque année 7,6 gigatonnes* [1 Gt valant 1 milliard de tonnes] *nettes d'équivalent CO_2, moins que les émissions du pays le plus polluant au monde, la Chine, avec ses 9,9 Gt annuelles,* selon une estimation de 2020, avance Nancy Harris, pilote du Global Forest Watch, un programme de surveillance mené au sein du WRI. *« Les absorptions brutes de carbone par les arbres sont de 15,6 Gt d'équivalent CO_2 par an, mais sont amputées par les émissions dues à la déforestation et autres perturbations des écosystèmes forestiers, que nous avons estimées à 8,1 Gt d'équivalent CO_2 annuelles. »*

15 milliards d'arbres seraient ainsi abattus chaque année, estimait en 2015 l'écologue Thomas Crowther, alors à l'université Yale (États-Unis). Le rythme ne faiblit pas, notamment dans les pays qui concentrent le plus de forêts, comme le Brésil. En janvier dernier, la déforestation de l'Amazonie aurait bondi de 418 % par rapport à l'année précédente. *« Sur les cinq dernières années, on observe un doublement des émissions de CO_2 liées à la déforestation, par rapport à la période*

17 millions d'hectares
La superficie occupée par les forêts en France.

13 %
La part des émissions de gaz à effet de serre absorbée chaque année par les forêts françaises.



PILAR VALBUENA/CIFOR

« Les forêts captent chaque année dans le monde 7,6 milliards de tonnes nettes d'équivalent CO_2 »

Nancy Harris, directrice de recherche du programme Global Forest Watch, au sein de l'Institut des ressources mondiales

THIERRY MONTFORD / NATURAGENCY

La canopée (ici en Guyane), avec ses feuillages directement exposés à la lumière du soleil, constitue un puits de carbone important, de même qu'un havre pour la biodiversité.

CORRÉLATION

La santé des forêts préserve celle des humains

Sida, Ebola, virus de Nipah, ulcère de Buruli, coronavirus… La dégradation des écosystèmes forestiers favorise l'émergence de maladies en augmentant le contact entre les humains et certains animaux, estiment une dizaine d'études. Une méta-analyse de 2017 portant sur 67 pays montre également une forte corrélation entre le taux de déforestation et le taux de prévalence du paludisme, véhiculé par les parasites des moustiques. Il serait illusoire de penser que les menaces sont limitées aux tropiques. La présence de la bactérie *Borrelia burgdorferi,* portée par les tiques et responsable de la maladie de Lyme, est réduite de 95 % dans les forêts où leurs populations hôtes (rongeurs, écureuils) sont les plus dynamiques et elles-mêmes régulées par des prédateurs (loups, lynx), montre une étude new-yorkaise de 2019. Conclusion : préserver la biodiversité et la chaîne alimentaire en forêt, c'est protéger notre santé.

2001-2005 », selon Philippe Ciais, chercheur au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, au CEA Paris-Saclay. Et ce, dans toutes les zones tropicales. Or c'est dans ces régions que les arbres ont le plus d'effet, notamment parce qu'ils *« ne sont pas que des éponges à carbone »*, pointe Deborah Lawrence, professeure de sciences environnementales à l'université de Virginie (États-Unis), qui vient de montrer dans une étude datant de mars que les arbres sont des héros *« vraiment cools »*, jouant avec le sens « rafraîchissant » du mot en anglais. Non contents de fournir de l'ombre, les arbres situés sous les tropiques agissent également comme des humidificateurs géants en tirant

PROGRAMMES

Replanter sans se « planter »

ISMAIL HAKKI DEMIR/ANADOLU AGENCY VIA AFP

90 % des 11 millions de pins et sapins plantés en Turquie le 11 novembre 2019 sont morts de soif trois mois plus tard.

Des graines larguées par des drones pour ensemencer des « fermes à carbone » et acheter des crédits d'émissions. C'est la lubie de Telstra, géant des télécommunications australien, qui a annoncé le 24 mars vouloir faire pousser 158 000 arbres sur 240 hectares au sud-est du pays. Impossible de savoir si des scientifiques sont associés au projet. Mais Telstra est confiant : *« Notre technologie de capteurs high-tech permettra de vérifier que ces jeunes arbres pousseront bien. »* L'initiative étonne. Chacun a en mémoire les déboires de la Turquie qui a planté 11 millions d'arbres le 11 novembre 2019 pour voir 90 % de ces pins et sapins dépérir de soif trois mois après, selon le syndicat des forestiers du pays. *« Nous avions pourtant averti qu'il fallait des gens compétents pour planter, que les sols étaient parfois impropres, que le niveau requis de précipitations ne serait pas au rendez-vous,* fulmine son président Sükrü Durmus. *Cette campagne populiste visant à masquer la destruction de nombreux autres arbres était destinée à entrer dans le livre des records. »* Pour résumer la pensée de nombreux écologues : *« Avant de cliquer sur un programme leur offrant de compenser leurs émissions carbone (voyage en avion, impression de papier), les citoyens doivent se méfier des objectifs trop audacieux et mal calibrés. »* Malheureusement, aucun organisme ne permet de faire le tri.

- l'eau du sol et en l'émettant par leurs feuilles, ce qui aide à refroidir la zone environnante d'une manière similaire à la transpiration. Cette évapotranspiration, à son tour, crée de bonnes conditions pour la formation de nuages qui contribuent au refroidissement en réfléchissant la lumière du soleil. Les arbres libèrent enfin des composés organiques — par exemple, les terpènes parfumés du pin — qui réagissent avec d'autres produits chimiques dans l'atmosphère, produisant ainsi un autre effet de froid. Les calculs de l'équipe de Deborah Lawrence suggèrent qu'*« en plus de leur effet pompe à carbone, les forêts aident à maintenir la Terre au moins un demi-degré plus frais »*.

La restauration forestière plutôt que la replantation massive

Les gardiens de la Terre ne veillent pas que sur son atmosphère : les arbres filtrent l'eau et participent à la potabilité des nappes phréatiques. Le couvert forestier protège aussi contre l'érosion des sols, et atténue les inondations en contribuant à retenir et redistribuer progressivement les précipitations. Les feuillages ainsi que les racines évitent aussi les glissements de terrain, notamment en montagne. La canopée fournit enfin une ombre propice à d'autres espèces, y compris animales. Et cette biodiversité est précieuse pour les humains *(lire l'encadré p. 40)*.

Faut-il dès lors planter en masse pour compenser la déforestation ? Dans une étude parue dans *Nature* en novembre 2021, des chercheurs indiens, américains et suédois ont passé au crible les impacts de programmes de plantation à grande échelle dans le nord de l'Inde, un pays qui a énormément investi au cours des cinquante dernières années dans les eucalyptus, hévéas, tecks.... *« Nous n'avons trouvé aucune preuve qu'elles offraient des avantages climatiques substantiels ou soutenaient les moyens de subsistance des communautés locales »*, regrette Vijay Ramprasad, du Centre d'écologie, recherche et dévelop-

EMERIC FOHLEN/HANSLUCAS

Hêtre de la Sainte-Baume

BIOSPHOTO

Calocèdre

BIOSPHOTO

Chêne pubescent

ALAMY/PHOTO12

Pin de Turquie

PHOTO12

Séquoia toujours vert

SHUTTERSTOCK

Cyprès d'Arizona

De nouvelles espèces sont testées pour renforcer l'adaptation des forêts aux changements climatiques en France. Ainsi est tentée la migration d'espèces du sud (hêtre de la Sainte-Baume planté dans le nord, calocèdre, chêne pubescent et pin de Turquie dans la forêt de Haye en Meurthe-et-Moselle) ou l'introduction d'espèces exotiques résistantes non invasives, comme le séquoia toujours vert ou le cyprès d'Arizona.

pement de Dehra Dun, en Inde, qui a utilisé les informations satellitaires comme les enquêtes de terrain pour mesurer l'impact biophysique et socio-économique de ces initiatives. *« Les écologues avertissent depuis des années que les plantations d'arbres ne sont pas équivalentes à la restauration forestière,* ajoute-t-il. *Pour atteindre nos objectifs climatiques, nous devrions aussi envisager de restaurer d'autres écosystèmes* », comme les mangroves, les herbiers sous-marins de posidonies, les tourbières ou les prairies, pelouses et savanes, montrent plusieurs études. Ignorant ces recommandations, nombre d'États et d'entreprises se lancent dans des programmes aux objectifs ambitieux, mais mal préparés et mal menés *(lire l'encadré p 38)*, espérant compenser ainsi leurs émissions de CO_2. *« Planter 1000 à 1200 milliards d'arbres, comme le suggérait en 2019 un article de l'Institut de biologie intégrative de Zurich (Suisse), ne va pas arrêter le changement climatique* », avertit Élise Buisson, de l'Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale, à l'instar de 45 autres scientifiques du monde entier. Le potentiel d'atténuation des arbres plantés arrivés à maturité (205 Gt pour 300 Gt émises depuis la révolution industrielle) y serait surestimé. Et il serait illusoire de penser que 900 000 millions d'hectares sont réellement disponibles pour semer efficacement. *« Planter ces végétaux au mauvais endroit peut détruire certains écosystèmes, augmenter l'intensité des feux et, à l'inverse, exacerber le réchauffement* », résume-t-elle.

Dès lors, quelle solution ? Préserver l'existant, voire l'enrichir ou le modifier en le diversifiant. Reforester intelligemment *in situ*. C'est l'un des objectifs de l'Office national des forêts (ONF), explique Xavier Bartet, membre du département recherche, développement

XAVIER BARTET

« Nous avons trois leviers d'action dont celui de tester de nouvelles essences »

Xavier Bartet, du département recherche, développement et innovation en France de l'Office national des forêts

SUZANNE SIMARD
BIOLOGISTE, PROFESSEURE D'ÉCOLOGIE FORESTIÈRE À L'UNIVERSITÉ DE COLOMBIE-BRITANNIQUE (CANADA)

« Les arbres les plus anciens jouent un rôle irremplaçable pour la biodiversité »

COLE BURSTON/AFP

"La forêt est un des écosystèmes les plus interconnectés ; elle est cruciale pour l'équilibre de la planète. Mes premières découvertes au sujet de l'interdépendance des arbres ont mis au jour le rôle qu'y joue la mycorhize, cette symbiose entre des champignons et les racines des plantes qui garantit la circulation de nutriments et d'alertes chimiques pour le bien-être d'une communauté de vivants. Ces recherches ont prouvé notamment que, par le biais d'un réseau mycorhizien, bouleaux et sapins de Douglas au sein d'une même plantation s'échangent le carbone nécessaire à la croissance, les uns palliant les carences des autres selon leurs rythmes saisonniers. La cohabitation de différentes essences est bénéfique à plusieurs titres. Ainsi, mélanger des feuillus comme le peuplier faux-tremble et le bouleau avec des conifères contribue à atténuer la prolifération d'insectes s'attaquant aux pins. Mais une forêt doit sa santé beaucoup plus à la biodiversité naturelle du milieu et à celle des milliers de champignons qui colonisent les racines et œuvrent en faveur de la résilience de l'écosystème, qu'à la diversité des espèces d'arbres qu'elle abrite. Les arbres les plus anciens — que je nomme arbres-mères — jouent un rôle irremplaçable pour le maintien de la biodiversité. Ils cachent un réseau mycorhizien incomparablement développé, stockent énormément de carbone et représentent un abri essentiel pour des créatures qui coopèrent en faveur de la stabilité écologique du territoire, comme les oiseaux et les insectes. Un vieil arbre conserve en mémoire les expériences du passé et les transmet aux jeunes plants : sa capacité à résister aux maladies et à s'adapter aux changements climatiques est inscrite dans la graine. Il est capital de ne pas se priver de ce précieux allié dans la lutte pour la régénération d'une forêt."

Propos recueillis par A. De B.

et innovation au sein de l'organisme. Il s'appuie sur l'outil ClimEssences qui devrait permettre à de nombreux forestiers publics ou privés de faire face aux défis en cours. Ses cartes permettent notamment aux décideurs de se projeter dans la France de 2050 et de 2070, avec une température moyenne augmentée de 1,5 à 4 °C. *« Nous avons trois leviers d'action,* explique le chercheur, *adapter nos actions sylvicoles, jouer sur les mécanismes évolutifs et tester de nouvelles essences.* » Dans certaines zones, on peut réduire la densité des arbres qui pompent trop d'eau (comme le saule) tout en veillant à ne pas altérer le microclimat de la forêt, assure-t-il. On peut aussi accélérer le brassage génétique au sein des peuplements, en introduisant des chênes du sud au milieu de ceux du nord. Et en espérant que ces rencontres produiront des hybrides résistants. La migration assistée consiste ainsi à implanter des hêtres et des chênes provençaux (comme ceux de la Sainte-Baume) dans le nord pour renforcer la résilience de ces forêts face au réchauffement climatique. Dans la forêt de Haye, en Meurthe-et-Moselle, trois essences, le chêne pubescent, le pin de Turquie et le calocèdre, ont été sélectionnées pour remplacer peu à peu le hêtre et le chêne pédonculé trop sensibles à la hausse des températures. Dernière option : tester des espèces exotiques non invasives : dix essences nouvelles, dont le pin de Macédoine, le liquidambar, le séquoia toujours vert, le chêne de Hongrie sont peu à peu plantées dans tout l'Hexagone dans 75 îlots d'avenir de deux hectares chacun. Dans les Vosges, où dépérissent les sapins blancs, ce sont ainsi des cyprès d'Arizona qui poussent désormais en enclos. Les résultats de ces expérimentations ne seront connus que dans plusieurs décennies. ■ **R. M.**

© SYLVAIN CORDIER/BIOSPHOTO

Les racines de l'arbre enrichissent les sols en profondeur, tandis que les feuilles assurent ce travail en surface (ici, des racines mises à nu par l'érosion, au Brésil).

Un riche partenariat avec les sols

Le système racinaire de l'arbre enfouit de la matière organique et remonte à la surface les éléments minéraux puisés en profondeur, assurant ainsi la fertilité des sols.

Immobiles, les arbres ne peuvent se soustraire à leur environnement et à leurs prédateurs. Mais ils ont en revanche la capacité de modifier le sol grâce à leurs feuilles comme à leurs racines. Une caractéristique essentielle pour la survie de l'humanité. Car notre alimentation dépend quasi exclusivement des sols de notre planète, l'une de ses ressources les plus précieuses et fragiles. Leur couche superficielle — dite arable —, dans laquelle se développent les végétaux, se forme en effet lentement : il faut environ dix siècles pour en produire trois centimètres dans les climats tempérés. Or, le travail du sol par des machines toujours plus lourdes, l'épandage de produits chimiques, le labour et la déforestation qui entraînent son érosion dégradent à l'échelle globale cette strate vitale pour la biodiversité. Une évolution qui pourrait menacer la sécurité alimentaire de milliards de personnes dans les soixante prochaines années.

Les feuilles sont les contributrices visibles de l'enrichissement du sol en matière organique. « *À l'automne, quand la photosynthèse commence à décroître, l'accumulation de tanins donne aux feuilles leurs couleurs dorée, rouge, etc.,* décrit Marc-André Selosse, biologiste au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. *À la manière de la crème solaire, ces tanins protègent les feuilles de l'oxydation par la lumière solaire. Mais c'est aussi le début du recyclage.* » À terre, le contenu des feuilles forme une combinaison brune avec les tanins, qui demeure insoluble dans l'eau pendant les mois d'hiver. Leur matière reste ainsi disponible jusqu'au printemps, au moment où les champignons vont l'attaquer et en libérer l'azote et le phosphate, dont profitent les racines pour nourrir de nouvelles feuilles. Ce phénomène cyclique participe à la construction des sols et à leur fertilité.

Une transformation chimique et biologique de l'environnement

Sous la surface, le système racinaire compose en moyenne un tiers de la biomasse d'un arbre. Les racines les plus fines — soit seulement 5 à 20 % de la biomasse — représentent 90 % de la longueur totale du système racinaire. Ce sont elles qui, en grandissant, explorent minutieusement leur environnement et y puisent les ressources diluées. Dans un sol souvent pauvre — les terres les plus riches ayant été défrichées pour en faire des zones de cultures —, l'arbre des forêts déploie ainsi des trésors d'ingéniosité pour recruter « *des bactéries capables de fixer l'azote atmosphérique ou d'émettre des hormones favorables,* souligne Marc-André Selosse. *Les racines transforment leur environnement chimiquement et biologiquement. C'est le phénomène de rhizosphère, décrit en 1904 par l'Allemand Lorentz Hilter, premier à parler de microbiote.*

AGROFORESTERIE

Recréer des parasols qui protègent les cultures

En France, le remembrement agricole, qui visait à rationaliser les parcelles pour en faciliter la culture mécanisée, a fait disparaître entre 1955 et 1975 nombre de bosquets et de talus boisés. Mais cette politique productiviste a rapidement conduit à la chute de la biodiversité, au ruissellement des eaux et à l'érosion des sols. Aujourd'hui, l'agroforesterie, une pratique ancienne qui associe arbres et cultures, connaît un regain d'intérêt, notamment dans les régions arides et semi-arides qui subissent une forte insolation. Sans arbre, la chaleur entraîne la remontée de la nappe phréatique et parfois son évaporation en surface, avec pour conséquence le dépôt de ses minéraux : cette salinisation peut stériliser les sols. La présence d'arbres réduit ce risque grâce à l'ombre de sa canopée, qui abaisse la température sous son couvert et donc l'évaporation. Elle permet aussi d'augmenter la teneur organique du sol et par là même sa capacité à absorber et retenir l'eau qui abreuvera les cultures agricoles. L'Inra a ainsi expérimenté l'alliance blé-peupliers à Restinclières (Hérault) et a démontré qu'une parcelle agroforestière pouvait produire 36 % de plus de biomasse qu'une parcelle remembrée.

ÉMILIE LOREAUX / HANS LUCAS

Une parcelle agroforestière (ici, mêlant noyers et culture de blé dur) peut produire 36 % de biomasse en plus.

La racine, d'où partent des fuites de carbone dans le sol, nourrit ainsi des populations microbiennes et les régule dans le même temps en produisant des tanins qui excluent les espèces qui ne lui sont pas favorables. »

Les racines ont également des associations symbiotiques avec des champignons mycorhiziens. La plante apporte des sucres aux champignons qui, de leur côté, permettent d'augmenter d'un facteur 1000 le contact avec le sol nutritif pour un coût énergétique moindre, fournissant en retour eau et minéraux. Au fil du temps, le réseau racinaire injecte donc de la matière organique dans les couches arables, notamment lorsque les racines meurent : « *De 30 à 90 % des racines les plus fines meurent chaque année. La mort racinaire produit alors l'équivalent d'un à cinq fois la quantité de feuilles qui tombent à terre en surface* », explique Marc-André Selosse dans son livre *L'Origine du monde**. Ainsi, la partie souterraine de l'arbre enfouit de la matière organique et remonte à la surface les éléments minéraux puisés en profondeur, assurant la fertilité des sols. Sans elle, les sols se stratifieraient rapidement.

« *La matière organique est le cœur tendre des sols*, souligne encore le biologiste. *Elle retient l'eau et les sels minéraux, donne du liant physique aux éléments minéraux et nourrit les microbes.* » Le carbone qu'elle contient se concentre principalement dans les 30 premiers centimètres du sol. À l'échelle mondiale, cette couche superficielle stocke quelque 1500 milliards de tonnes de carbone, plus du double de ce que peut emmagasiner la végétation. Sachant qu'une forêt française augmente chaque année de 1 à 3 % la teneur en carbone de ses sols, la partie invisible de l'arbre est aussi un puissant allié dans la lutte contre le réchauffement climatique. ■ **S. R.**

@srouat1

D. GOUPY/SIGNATURES

« La mort racinaire produit l'équivalent en matière organique d'un à cinq fois la quantité de feuilles qui tombent à terre en surface »

Marc-André Selosse, biologiste au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

* Actes Sud, 2021.

PIERRE ADENIS/LAIF-REA

Les arbres urbains ont pour bienfait de limiter les effets de l'émission de milliers de tonnes de polluants, en absorbant ceux-ci grâce à leurs feuilles et en interceptant les particules en suspension dans l'air.

Un bouclier efficace dans les villes

La présence massive d'arbres en milieu urbain est un atout indispensable pour rendre nos cités plus respirables. Car ces végétaux jouent un rôle fondamental dans la régulation des pics de chaleur et la qualité de l'air.

La lecture des études de santé publique, suffocante, donne l'envie immédiate d'aller sous un chêne ou de choisir ses itinéraires en fonction de leur couverture arborée ! 91 % des habitants des zones urbaines, représentant 55 % de la population mondiale, respirent un air pollué, *« à l'origine de 7 millions de décès prématurés et de la perte de millions d'années de vie en bonne santé »*, pointe l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Dans la ville cuvette de Grenoble (Isère), la pollution atmosphérique fait un mort tous les trois jours, selon une étude de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm) publiée en 2019. Et *« 40 % des cas de démences pourraient être évités ou retardés en agissant sur des facteurs modifiables, au sein desquels figure la pollution de l'air »*, ajoute une autre étude de l'Inserm de mars dernier.

Mais des travaux scientifiques récents suggèrent que plus d'arbres pourraient rendre les villes plus respirables. *« Grâce à eux, il est possible d'améliorer la qualité de l'air et d'améliorer ainsi la santé humaine,* assure David Nowak, spécialiste du sujet qui officie au Département de l'agriculture des États-Unis (USDA). *Annuellement, dans les 48 États américains contigus, les arbres urbains limitent les effets de l'émission de milliers de tonnes de polluants, permettant d'économiser 2,46 milliards d'euros.* »

C'est que l'arbre n'a pas pour seul atout de relâcher de l'oxygène lors de la photosynthèse : la végétation intercepte en surface les particules atmosphériques en suspension dans l'air (d'un diamètre inférieur à 10 micromètres, PM 10, ou à 2,5 micromètres, PM 2,5) et absorbe les polluants au travers de ses stomates — minuscules orifices qui assurent les échanges gazeux au niveau des feuilles. Tous ne le font pas avec la même efficacité.

Aussi, il est crucial de bien choisir les

espèces selon la taille de la canopée, la surface foliaire, la durée de la période pendant laquelle elles gardent leurs feuilles, et même la rugosité de celles-ci pour mieux « accrocher » les polluants. Et le choix sera différent selon les villes, en fonction des précipitations et des autres variables météorologiques qui influent sur leurs performances. À Strasbourg, *« la végétation arborée permet d'éliminer annuellement 7 % des PM10, 1,5 % des PM 2,5, 0,3 % du monoxyde de carbone, et 0,5 % de dioxyde de soufre »*, souligne Christiane Weber, géographe à l'université de Strasbourg (Haut-Rhin) et directrice de recherche au CNRS.

Les végétaux urbains réduisent la climatisation des bâtiments

Réintroduire l'arbre en ville a aussi une autre vertu : *« Il fait baisser les températures »*, assure David Nowak. Or les épisodes de canicules, en particulier en ville où se forment des îlots de chaleur, sont associés à une augmentation de la mortalité, particulièrement chez les personnes âgées, ou souffrant de maladies cardio-vasculaires, cérébro-vasculaires et respiratoires. La canicule qui a sévi en Europe à l'été 2003 a provoqué plus de 70 000 décès, dont 19 490 en France. Et le changement climatique en cours ne fera qu'aggraver les problèmes. Le refroidissement obtenu grâce aux végétaux a également un effet sur la chimie des polluants, diminuant la volatilité de certains gaz, alors que la chaleur estivale favorise la formation photochimique d'ozone très irritant. Et ce n'est pas tout : en contribuant à rafraîchir le climat local, les arbres urbains réduisent la climatisation des bâtiments.

La régulation du climat et de la qualité de l'air ne sont pas les seuls bénéfices des végétaux. *« Des études de plus en plus nombreuses attestent que leur vue et leur compagnie contribuent à notre santé mentale et à notre bien-être, et que les urbains en ont particulièrement besoin »*, résume le neuroscientifique Michel Le Van Quyen, de l'Institut du cerveau et de la moelle épinière à Paris, qui vient de publier *Cerveau et nature (lire p. 90)*. Sans compter que les arbres forment un écran contre le bruit, en absorbant ou déviant ses ondes. Or, cette nuisance est source de stress, de troubles du sommeil, de maladies cardio-vasculaires, voire de pertes d'audition selon l'OMS. Une place végétalisée, c'est 2 à 4 décibels en moins qu'une place asphaltée, selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe).

F. GUÉNET/DIVERGENCE

« Des études nombreuses attestent que la compagnie des arbres contribue à notre santé mentale et à notre bien-être »

Michel Le Van Quyen, chercheur à l'Institut du cerveau et de la moelle épinière, à Paris

PHOTO12.COM

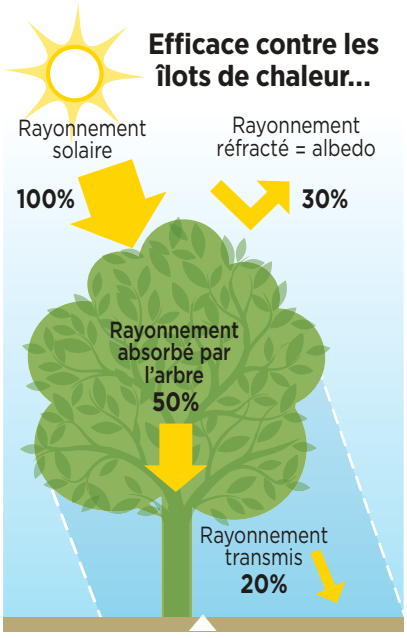
GETTY IMAGES

Le chêne de Virginie (en haut) et le **sycomore** (ci-dessus) détiennent le record de qualités pour contribuer à un meilleur environnement en ville.

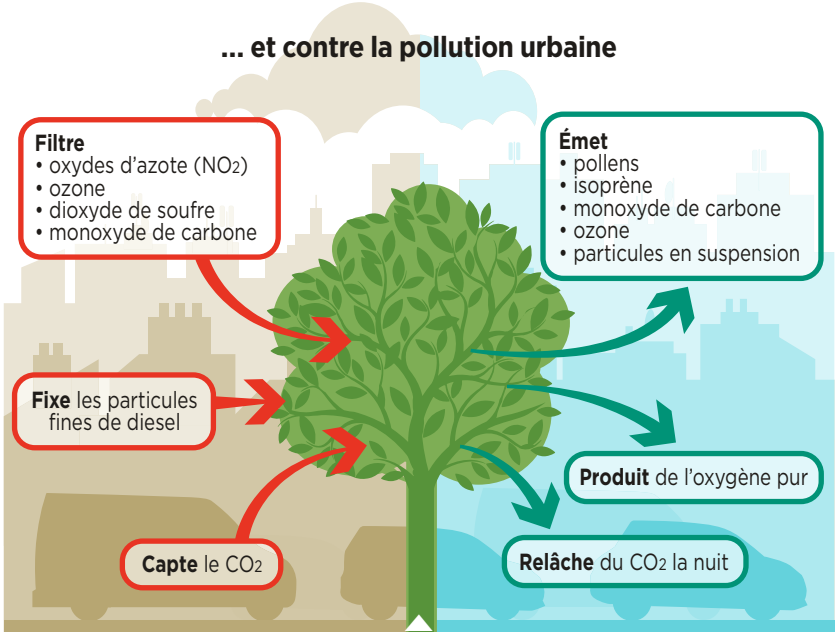
Comment dès lors choisir une espèce pour optimiser ses bienfaits ? La question est délicate. Surtout qu'un mauvais choix peut être contre-productif. Los Angeles et Miami, aux États-Unis, déplorent que leurs célèbres mais trop nombreux palmiers produisent des aérosols dont l'effet polluant devient flagrant maintenant que la pollution automobile est plus régulée. Les études menées à l'échelle urbaine ou territoriale en France sont hélas rarissimes. L'évaluation des gains à Strasbourg (Haut-Rhin) — qui a convaincu la métropole d'Alsace d'augmenter sa couverture arborée de 10 000 arbres d'ici à 2030 — s'est faite à l'aide du logiciel I-Tree développé par David Nowak*. Il permet notamment de calculer, par espèce, l'absorption du dioxyde de carbone et d'autres polluants atmosphériques. De nouveaux développements s'intéressent à la rétention des eaux pluviales, à la lutte contre les îlots de chaleur urbains ou à l'isolation thermique des bâtiments voisins.

Des espèces distinguées pour leurs effets bénéfiques

C'est aussi le logiciel I-Tree, couplé à d'autres modélisations et calculateurs, que Deborah January-Bevers de l'université Rice, à Houston (États-Unis) a utilisé pour dresser, en 2021, le profil de 17 « super-arbres » pouvant rendre la vie plus douce dans sa ville. La chercheuse a évalué le score de 54 espèces indigènes sur quatre critères — la capacité à absorber le carbone, à éliminer les polluants, à limiter les inondations et



Grâce au couvert végétal, seuls 20 % du rayonnement atteignent le bitume.



Si les arbres captent le CO_2, réduisent la teneur de l'air en gaz polluants et en particules fines, produisent de l'oxygène, ils émettent aussi de l'isoprène pouvant former de l'ozone et des pollens, à l'origine d'allergies.

enfin à atténuer les îlots de chaleur. Sur le haut du podium : le chêne de Virginie et le sycomore. Elle a écarté les espèces aux pollens trop allergisants, ou hôtesses de vecteurs de maladies ou encore incapables de résister aux 3 °C de plus attendus en température moyenne d'ici à 2036 dans la région. Quant à celles qui émettent le plus d'isoprène susceptible de former de l'ozone, comme le liquidambar ou le chêne vert, si elles n'ont pas été éliminées, c'est que les plantations se feront dans une approche multi-espèces et que leur impact sera significativement moindre que celui des services écosystémiques rendus par une plus large couverture arborée. Houston prévoit en effet de planter 4,6 millions d'arbres d'ici à 2030 ! En France, c'est pour la ville de Metz, dans le Grand Est, que l'étude la plus poussée a été menée, entre 2017 et 2019, par le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema). Luc Chrétien, qui la pilote, revendique une approche très différente de la chercheuse texane : pas question de distinguer une dizaine de super-espèces sur quatre critères seulement. Son équipe évalue 26 services, allant de la régulation climatique à l'offre d'habitats pour la biodiversité ou la régulation quantitative de l'eau, en passant par la fixation et rétention des sols. L'approche tient compte également des contraintes posées par les végétaux (pollen…) et des maladies les affectant. Pour Metz, cinq critères ont été retenus, parmi lesquels ceux de la régulation de la qualité de l'air et du climat local, mais aussi la pollinisation et l'expérience esthétique et paysagère. Les fiches détaillées de pas moins de 83 espèces — dont le micocoulier occidental ou l'érable champêtre — ont été proposées aux décideurs. Selon le chercheur, il faut éviter les phénomènes de mode : les platanes, dont on avait mésestimé l'effet urticant — provoquant rhinites et conjonctivites —, ont longtemps été la coqueluche des grandes villes comme Paris et Lyon. Et les alignements d'une même espèce succombent en masse quand une maladie vient les frapper. L'effet des arbres est aussi très dépendant de leur organisation dans l'espace, argue-t-il. Il faut pouvoir jouer sur de multiples espèces — y compris des arbustes — en y ajoutant les lierres, et organiser différentes strates. *« Un mauvais agencement, par exemple des arbres à large canopée au-dessus d'une artère automobile ou dans des rues étroites bordées de bâtiments, peut aboutir à un effet de tunnel vert, où les polluants se concentrent car le vent y est freiné,* illustre Luc Chrétien. *Arborer intelligemment une ville, c'est ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier et organiser la diversité ! »* ■ **R. M.**

@RachelFleaux

30 %
des besoins en climatisation peuvent être réduits par des arbres bien placés, selon l'ONU.

60 à 70 fois plus de pollution
éliminée par un arbre de grande taille d'un diamètre de tronc de 76 cm par rapport à un juvénile d'un diamètre inférieur à 7,6 cm.

* www.itreetools.org

HELENA VALENZUELA WIDERSTRÖM/COLUMBIA UNIVERSITY.

Quatre années auront été nécessaires aux chercheurs pour sélectionner et identifier la possible exolune (en bleu) gravitant à 740 000 kilomètres de sa planète, soit deux fois la distance Terre-Lune (vue d'artiste).

Exolunes
Elles se dévoilent enfin

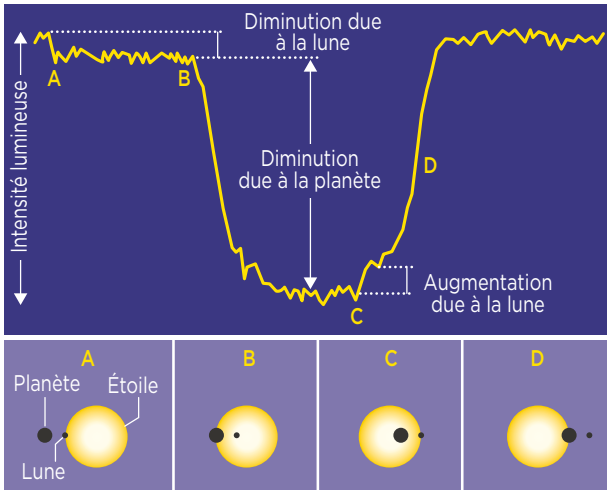
Des astronomes américains annoncent avoir débusqué ce qui pourrait être un astre gravitant autour d'une planète extrasolaire, Kepler-1708-b. Une première historique si la découverte se confirme, permettant de franchir une nouvelle frontière en astronomie et d'ouvrir un champ de recherche extrêmement prolifique.

Par Franck Daninos @fdaninos

L'astre se situerait à 5600 années-lumière de la Terre, dans la constellation du Cygne. Il orbiterait autour d'une planète de la taille de Jupiter, nommée « Kepler-1708-b » par les astronomes, qui gravite elle-même autour d'une étoile similaire au Soleil. Et selon des chercheurs de l'université Columbia à New York (États-Unis), il pourrait marquer l'histoire de l'astronomie en étant identifié comme la toute première exolune — le satellite d'une exoplanète (planète extrasolaire) autrement dit à l'instar de notre compagnon céleste la Lune. *« Cela fait quinze ans que nous traquons ce type d'objets,* confie David Kipping, auteur principal de l'étude. *Et il nous a fallu quatre années pour passer en revue des dizaines de candidats possibles jusqu'à débusquer ce qui s'apparente fortement à une lune extrasolaire.* » Si cette découverte se confirme, elle permettrait de franchir une nouvelle frontière en astronomie et ouvrirait un champ de recherche extrêmement prolifique. *« Les exoplanètes ont révolutionné notre compréhension des autres systèmes stellaires mais elles ne constituent qu'une partie du tableau,* souligne en effet David Kipping. *En raison de leur abondance et diversité supposées, les lunes extrasolaires nous apprendraient elles aussi énormément de choses sur notre unicité et la manière dont ces systèmes se forment.* »

On dénombre quantité de satellites naturels dans notre système solaire. Les planètes les plus internes, Mercure et Vénus, en sont certes dépourvues, mais la Terre en possède un et Mars deux, tandis que les géantes gazeuses Jupiter et Saturne en hébergent près de 80 chacune, sans compter ceux d'Uranus (27) et Neptune (14). Soit plus de 200 en tout, avec de remarquables disparités. Si certaines lunes, à l'instar de Titan, possèdent une atmosphère épaisse et des lacs d'hydrocarbures, d'autres comme Io sont ▸

agitées par une intense activité volcanique, et d'autres encore, telles Encelade ou Europe, recèlent des océans subglaciaires qui pourraient abriter la vie *(lire l'encadré p. 49)*. *« Il n'y a aucune raison pour qu'il n'en soit pas de même dans les autres systèmes stellaires,* signale Jean Schneider, de l'observatoire de Paris. *Les exolunes doivent pulluler autour des milliards de milliards d'étoiles de la galaxie, avec une richesse encore plus importante que ce qu'on a pu observer jusqu'ici.* »



BRUNO BOURGEOIS

La méthode des transits est la technique phare pour détecter des exoplanètes et de potentielles exolunes : les scientifiques traquent une baisse de luminosité supplémentaire lorsque l'exoplanète éclipse son étoile, mais aussi de petits décalages dans le temps dus aux différentes positions de la lune (A, B, C ou D).

Plusieurs facteurs rendent la traque difficile

Mais alors que plus de 5000 exoplanètes ont été mises en évidence depuis 1992, aucune exolune n'a été formellement identifiée. Comment l'expliquer ? Pour détecter des exoplanètes, la méthode la plus utilisée est celle dite des transits. Elle consiste à observer d'infimes baisses de luminosité (de l'ordre de 1 %) lorsque celles-ci passent devant leur étoile, un peu comme une éclipse. Le même phénomène devrait se produire quand les exolunes croisent la ligne de visée. Mais ces objets sont par définition bien plus petits que leur exoplanète, générant des « mini-éclipses » encore plus ténues. *« Et puisque les deux astres sont très proches l'un de l'autre, les deux signaux se superposent, ce qui rend la discrimination extrêmement ardue* », précise Virginie Batista de l'Institut d'astrophysique de Paris.

Les technologies disponibles induisent par ailleurs des biais observationnels. Le télescope Kepler, par exemple, exploité par la Nasa entre 2009 et 2018 et grâce auquel la majorité des exoplanètes a été identifiée, est ainsi limité par les dimensions de son miroir (1,4 mètre de large) et ce faisant, sa résolution. Par la méthode des transits, il lui est donc très difficile de dévoiler des objets globalement plus petits que la Terre. *« Or, à titre de comparaison, dans le Système solaire la plus grosse lune est Ganymède, satellite de Jupiter dont le diamètre équivaut à 40 % de celui de la Terre. Kepler serait donc aveugle à toutes les lunes que nous connaissons en raison de leur taille et de leur distance par rapport au Soleil* », note Virginie Batista.

Une dernière gageure provient de la méthode des transits elle-même. Elle est particulièrement efficace pour détecter des planètes très proches de leur étoile — 80 % des exoplanètes découvertes jusqu'à présent se situent à moins de 30 millions de kilomètres de leur étoile. Car ces astres présentent de très courtes périodes orbitales : ils effectuent une révolution complète en quelques jours seulement, ce qui maximise le nombre de transits observables et les probabilités de les repérer. Mais ces exoplanètes sont aussi celles qui sont le moins susceptibles de posséder des satellites naturels, comme on le constate dans le Système solaire avec Mercure et Vénus. *« À de telles distances, la force gravitationnelle de l'étoile est si intense qu'elle déstabilise les lunes éventuelles, en les happant ou les éjectant* », indique Francis Selsis, du Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux. Pour « décrocher » une exolune, il faut donc se focaliser sur de très gros objets et des exoplanètes éloignées de leur étoile… Et avoir aussi énormément de chance, puisque ces dernières mettent plusieurs années voire dizaines d'années à boucler une révolution. *« Face à de telles difficultés, il n'est pas surprenant qu'aucune exolune n'ait été jusqu'à présent découverte* », relève Franck Selsis.

Mission impossible, alors ? Pas pour David Kipping et ses collègues de l'université Columbia qui ont fait de la chasse aux exolunes leur spécialité. Ils ont développé toute une méthodologie et des algorithmes d'intelligence artificielle visant à reconnaître diverses signatures. Publié en janvier, le bilan de leur dernière enquête concerne 70 exoplanètes dont les transits ont été enregistrés par Kepler. Elles ont été sélectionnées en raison de leur taille semblable à Jupiter, susceptible d'hé-

VIRGINIE BATISTA

« Le travail accompli est remarquable et le candidat très prometteur »

Virginie Batista, chercheuse à l'Institut d'astrophysique de Paris

EXOBIOLOGIE

Des lunes « super-habitables »

Les exolunes pourraient être le meilleur endroit où rechercher une vie extraterrestre. Pour Jean Schneider, de l'observatoire de Paris, *« c'est même l'une des principales raisons pour lesquelles on les traque »*. Bien plus nombreuses que les exoplanètes, elles augmenteraient en effet les probabilités pour qu'une forme de vie émerge autour d'une étoile. *« Alors que les géantes gazeuses de type Jupiter ou Saturne n'ont quasiment aucune chance d'abriter la vie, ces astres peuvent héberger des objets rocheux potentiellement habitables, comme on l'envisage dans le Système solaire pour Europe ou Encelade »*, souligne l'astronome. En 2018, des chercheurs de l'université du Queensland du Sud (Australie) ont même démontré que les exolunes pourraient constituer des havres « super-habitables », encore plus favorables à la vie que la Terre. Ces satellites bénéficieraient de plusieurs sources d'énergie pour alimenter une biosphère. Outre celle fournie par l'étoile, ils tireraient profit de la lumière et de la chaleur émises par leur planète ainsi que des forces de marée générées par celle-ci.

MARK GARLICK/SPL/SUCRE SALÉ

Plusieurs sources d'énergie pourraient rendre l'environnement des exolunes très favorable à la vie (vue d'artiste).

berger des satellites imposants, et parce qu'elles gravitent à plus de 240 millions de kilomètres de leur étoile, où les lunes ont le plus de chance de s'être stabilisées.

Les futurs transits pourront apporter la preuve définitive

Deux types de signaux ont été recherchés : des mini-éclipses d'abord, mais aussi de petites variations sur le moment du transit *(voir l'infographie ci-contre)*. *« Ces décalages résultent du mouvement de rotation des lunes,* détaille Franck Selsis. *Elles occupent diverses positions d'un transit à un autre, en suivant ou précédant leur planète par exemple, ce qui génère des signaux légèrement différents et non périodiques. »*
Plusieurs prétendantes ont été ainsi décelées. Mais après avoir passé une batterie de tests, la plupart ont dû être éliminées. Les baisses de luminosité pouvaient être confondues avec des artefacts (bruits de fond) instrumentaux ou encore des irrégularités dans l'activité des étoiles, à l'instar des taches solaires. Au final, il n'en restait plus qu'une. *« C'est un signal têtu,* atteste David Kipping. *Nos données montrent qu'il n'y a que 1 % de chance que nous ayons affaire à une fausse alerte. »* Selon les calculs, l'objet (baptisé provisoirement « Kepler-1708 b-i ») se situerait à 740 000 km de sa planète, soit deux fois la distance Terre-Lune. Et mettrait un peu plus de quatre jours à orbiter autour d'elle, contre près de vingt-huit pour l'astre sélène. Il serait surtout énorme : 2,6 fois le diamètre de la Terre !
« Les courbes de luminosité sont très nettes, je suis plutôt convaincu », s'enthousiasme Jean Schneider. *« Le travail accompli est remarquable et le candidat très prometteur, même si d'autres données seront nécessaires pour le confirmer »*, juge pour sa part Virginie Batista. Car les scientifiques américains n'ont pu se fonder que sur les deux seuls transits enregistrés par Kepler, *« ce qui est trop peu pour comparer finement les signaux, les variations sur le moment du transit en particulier,* pointe Franck Selsis. *Il en faudrait au minimum trois. »* David Kipping espère que les futurs transits de la planète — qui met 737 jours à compléter une période orbitale — apporteront bientôt ces preuves décisives. Et alors que la prochaine échéance se produira le 24 mars 2023, il projette d'utiliser plusieurs télescopes dont le nouvel observatoire spatial de la Nasa James-Webb, doté d'un miroir de 6,5 mètres de diamètre. *« Opérationnel à partir de cet été, ce télescope sera plus précis et meilleur que tous les autres pour déceler des lunes extrasolaires »*, trépigne Jean Schneider. Son entrée en scène est donc très attendue. ■

Un laboratoire volant pour l'avion à hydrogène

Airbus, associé à Safran et à General Electric, va développer un avion à propulsion à hydrogène qui permettrait de ne plus émettre aucun gaz à effet de serre. Ce laboratoire volant testera le stockage de ce carburant inédit mais aussi l'alimentation du réacteur.

Avec ce drôle de réacteur qui lui fait comme une excroissance sur le fuselage, nul doute que cet Airbus A380 attirera les regards. D'autant qu'il ne transportera pas des touristes, mais des ingénieurs chargés de tester grandeur nature l'avion à hydrogène. Le 22 février, Airbus a en effet annoncé la signature d'un partenariat avec deux motoristes, le français Safran et l'américain General Electric, associés au sein de la structure CFM International, afin de mettre au point un avion « démonstrateur » doté d'un réacteur à hydrogène, en plus de ses quatre réacteurs classiques au kérosène. L'engin devrait prendre son envol fin 2026 au plus tard. Pour Airbus, il s'agit d'accélérer la cadence vers une limitation des émissions de gaz à effet de serre, dans le sillage d'un rapport du Groupe d'action du transport aérien (ATAG), qui a fixé l'année dernière comme objectif la neutralité carbone de l'aviation en 2050. *« C'est un défi considérable car cela veut dire remplacer 400 millions de tonnes de kérosène en 2050,* explique Nicolas Jeuland, expert « carburant du futur » chez Safran. *Heureusement, nous disposons de plusieurs voies pour y parvenir, à commencer par les économies d'énergie avec la mise au point de moteurs plus performants et plus sobres, des avions plus légers, l'optimisation des routes aériennes, la diminution des temps d'attente au-dessus des aéroports. Nous aurons aussi recours aux carburants neutres en carbone* [lire l'encadré p. 52]… *La solution globale viendra d'une combinaison de tous ces leviers. L'hydrogène aura sa place, reste à préciser laquelle et c'est notamment l'objectif des tests qui seront effectués sur l'A380. »*

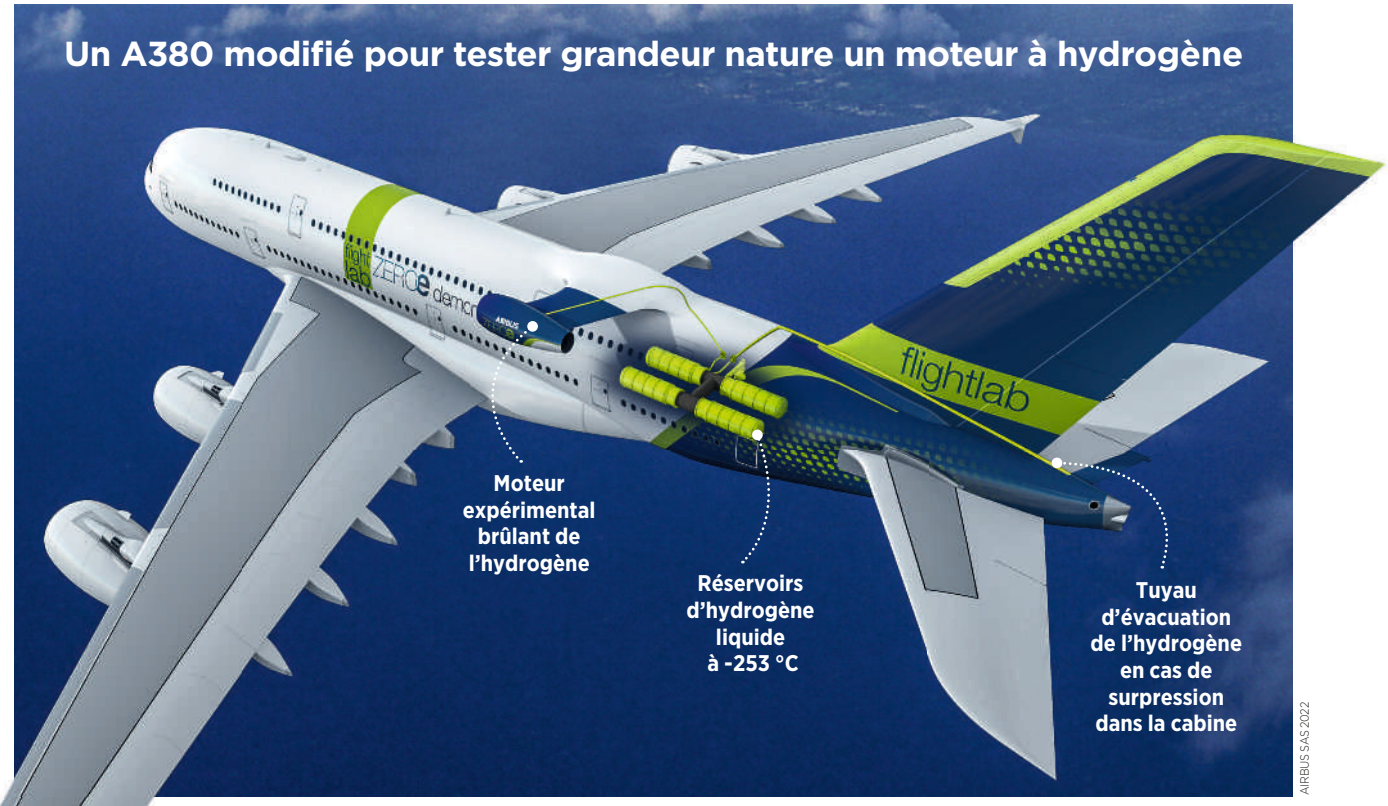
Mais le kérosène sera bien difficile à détrôner, comme le rappelle Nicolas Jeuland, passé par l'Institut français

MOTEUR ÉLECTRIQUE

La pile à combustible adaptée à l'aéronautique ?

Il existe une autre manière d'utiliser l'hydrogène que de le brûler. Une pile à combustible (PAC) permet de fabriquer de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène, ne rejetant que de l'eau. Pourrait-on imaginer des gros-porteurs équipés de moteur électrique alimenté avec des PAC ? Difficile, car selon Mathias Andriamisaina de chez Airbus, *« la masse du système propulsif avec une PAC serait trop importante. En revanche, nous pourrions les utiliser comme source auxiliaire de puissance afin de fournir l'électricité dont l'avion a besoin pour ses équipements. Ou bien utiliser des moteurs électriques, plutôt que les réacteurs, pour faire rouler les avions sur le tarmac. »*

Un A380 modifié pour tester grandeur nature un moteur à hydrogène



AIRBUS SAS 2022

du pétrole : « *Les avions consomment en réalité du "jet fuel", du kérosène avec différents additifs qui en font un produit optimisé pour l'aviation et surtout standardisé. C'est comme le Coca-Cola : il doit être identique partout dans le monde de sorte qu'un appareil faisant le plein par 40 °C à Bali ou par -30 °C à Vancouver ne rencontre pas de difficulté, ni d'approvisionnement au sol, ni d'utilisation en vol.* »

Résoudre le problème de l'encombrement du carburant

L'hydrogène est-il un bon candidat de substitution ? En tous les cas, il possède assez de qualités pour que les avionneurs s'y intéressent de près. D'abord, il n'émet pas de CO_2 : sa combustion dans l'air produit surtout de l'eau, et des oxydes d'azote. Il n'engendre pas non plus de suies. Il peut être produit à « bas carbone », si on l'obtient à partir d'une électrolyse de l'eau réalisée avec de l'électricité d'origine renouvelable. Côté énergie, un kilogramme d'hydrogène liquide en libère trois fois plus qu'un kilogramme de kérosène. En revanche, ce kilogramme d'hydrogène prend quatre fois plus de place. Finalement, pour une même quantité d'énergie délivrée, l'hydrogène liquide est donc plus encombrant. Les ingénieurs d'Airbus vont devoir composer avec tous ces éléments pour concevoir un avion à hydrogène d'ici à 2035, objectif fixé par l'avionneur.

400 millions de tonnes

de kérosène en 2050 devront être remplacées par d'autres carburants pour atteindre l'objectif de neutralité carbone de l'aviation.

« *D'où la conception de ce laboratoire volant,* détaille Mathias Andriamisaina, responsable des activités de démonstrations et de tests des technologies hydrogène chez Airbus. *Nous utilisons un avion d'essai A380 que nous connaissons déjà bien car il a notamment servi à tester les moteurs de l'A350, l'autre gros-porteur de notre gamme. Notre objectif est de tester en vol le plus rapidement possible les différentes composantes d'une propulsion à l'hydrogène : le stockage, l'acheminement jusqu'à la chambre de combustion, la turbine. Dans un premier temps, nous allons tester les technologies, l'optimisation viendra ensuite.* » Basé à Toulouse (Haute-Garonne), l'A380 servira d'abord à expérimenter l'approvisionnement de l'appareil en hydrogène. Une gageure, car le combustible est stocké sous forme liquide par -253 °C, contrairement au « jet fuel » qui se trouve à température ambiante. Si d'aventure l'hydrogène venait à s'imposer, il faudrait revoir toute l'infrastructure aéroportuaire destinée au remplissage des avions.

C'est également sous la forme d'un liquide cryogénique qu'il sera stocké à bord. « *Cela constitue l'une des difficultés majeures,* estime Mathias Andriamisaina. *Nous devons mettre au point un système de réservoir avec une isolation très poussée car il n'y aura pas de système frigorifique actif.* » L'autre impératif sera de limiter le risque de fuite : le dihydrogène (H_2) étant la plus petite molécule de la chimie, il peut se faufiler très facilement. « *Le combustible sera stocké dans un conteneur isolé, parfaitement étanche. Pour l'acheminer, nous envisageons d'utiliser des tuyauteries "double peau" qui conservent la température et assurent une barrière de protection supplémentaire. Enfin, nous devrons considérer le cas où toutes les barrières mises en place pour contenir les fuites auraient cédé. Cela veut dire concevoir un système de ventilation très efficace pour éviter l'accumulation de dihydrogène, et le risque d'explosion.* »

AURÉLIE LA MACHÈRE/SAFRAN

« Nous allons nous concentrer sur le développement du moteur hydrogène complet »

Nicolas Jeuland, expert « carburants du futur » chez Safran, groupe industriel français spécialisé dans l'aéronautique, le spatial et la défense

Le moteur proprement dit sera fourni par Safran et General Electric. Ils bénéficieront de l'expérience d'Ariane, la fusée embarquant un système de stockage cryogénique pour refroidir l'hydrogène liquide, l'un des ergols consommés par Ariane 5. Mais il ne s'agit pas de transformer l'Airbus en fusée… La problématique diffère entre un moteur qui ne sert qu'une fois, et un réacteur destiné à fonctionner durant des milliers d'heures. « *Nous allons nous concentrer sur le développement du moteur hydrogène complet,* reprend Nicolas Jeuland. *Il faut concevoir le système d'injection de l'hydrogène, avec un challenge de taille : mettre au point le circuit permettant de passer de l'hydrogène liquide du réservoir à l'hydrogène gazeux sous pression injecté dans la chambre de propulsion. Les températures de combustion de l'hydrogène sont différentes de celles du kérosène, ce qui nécessite d'optimiser la combustion et de vérifier que les matériaux sont compatibles. Par ailleurs, la combustion produit de l'eau : faut-il craindre la corrosion ? Enfin, dans l'hypothèse où nous ne serions pas en mesure de garantir la qualité de l'hydrogène partout sur le globe, quelles seraient les conséquences de la présence d'impuretés sur les performances du moteur ?* »

Objectif : commercialiser un moyen-courrier en 2035

La feuille de route, ou plutôt le plan de vol de l'Airbus A380 est donc bien rempli. L'objectif est de parvenir à mettre au point un modèle commercialisable en 2035. Mais ce ne sera pas tout de suite un gros-porteur de type A380. Pour les vols long-courriers, la quantité d'hydrogène à emporter serait trop importante. La stratégie d'Airbus s'oriente vers des moyen-courriers, d'une capacité maximale de 200 passagers. Même son de cloche du côté du concurrent américain Boeing, qui ne croit pas non plus dans les gros-porteurs à hydrogène. Après l'ère du carburant unique, l'aérien se dirige donc vers les solutions multiples afin de concilier les voyages et l'écologie. ■ **Fabrice Nicot** @fnicot07

DÉVELOPPEMENT

Les carburants synthétiques, l'autre voie pour décarboner l'aérien

D'un côté, de l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau à partir de courant électrique issu d'énergies renouvelables. De l'autre, du dioxyde de carbone prélevé dans l'atmosphère ou à la sortie des cheminées d'usine. La combinaison des deux donne un carburant synthétique « bas carbone » pouvant se substituer aux combustibles fossiles. Sa combustion rejette certes du CO_2, mais c'est celui capté pour sa fabrication. Le bilan est donc neutre.

Ce secteur est en pleine ébullition. En janvier, Engie, le fournisseur français de gaz naturel, et Safran ont investi dans Ineratec, une start-up allemande spécialisée dans ce type de production. La jeune pousse a le projet de construire une usine pilote à Francfort capable de produire 3500 tonnes de carburant par an, dont du carburant aérien de synthèse. En février, Engie, allié cette fois à l'entreprise américaine Infinium, a annoncé la construction d'une usine près de Dunkerque (Nord) en 2026. Objectif : fabriquer des carburants synthétiques grâce aux 300 000 tonnes de CO_2 captées sur les installations de production d'acier par ArcelorMittal, et de l'hydrogène vert produit par un électrolyseur de 400 millions de watts construit à proximité.

SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

L'ARABIE SAOUDITE

s'ouvre au Monde

C'est à une exploration de trésors archéologiques extraordinaires que Sciences et Avenir - La Recherche convie aujourd'hui ses lecteurs dans un pays qui commence tout juste à s'ouvrir aux touristes. Qui dit Arabie Saoudite pense surtout or noir et pays hermétique. Mais le royaume, de son côté, pense déjà à l'après-pétrole. D'où l'ouverture des frontières décidée dès l'année 2019, refermées pour cause de Covid19 puis ré-ouvertes, ce qui autorise ce voyage inoubliable. Spécialement pour notre groupe, des scientifiques amis de notre magazine décrypteront l'histoire du pays à travers les siècles, et tout particulièrement de la légendaire civilisation des Nabatéens, mentionnée dans la Bible et le Coran. Il sera ainsi possible de découvrir une oasis aussi renommée que celle d'Al-'Ulâ, dans la province de Médine, pour laquelle un partenariat de cinq ans avec l'Unesco a été signé à l'automne 2021 par la « Commission Royale pour Al-'Ulâ ». Un gigantesque centre de recherche en archéologie doit y être installé. Le désert de ce qui est le plus grand pays du Moyen-Orient, jadis arpenté par Lawrence d'Arabie et depuis vingt ans par d'éminentes équipes françaises d'archéologues, recèle en effet des architectures monumentales spectaculaires. Autre étonnante vision, celle des grandes villes - Djeddah, inscrite au patrimoine mondial de l'Unesco et la capitale Riyad avec son célèbre gratte-ciel pyramidal surmonté d'un globe de verre, conçu par la star de l'architecture high-tech Norman Foster. Un voyage exceptionnel en perspective.

DOMINIQUE LEGLU, *directrice éditoriale de Sciences et Avenir - La Recherche*

BERNADETTE ARNAUD, *grand reporter à Sciences et Avenir - La Recherche*

5 990 € par pers. en chambre double | 10 JOURS / 9 NUITS | www.sav-alula.fr | Tél. 01 84 76 08 83

DU 12 AU 22 NOV. 2022 | AVEC **BERNADETTE ARNAUD**, Grand reporter et **VINCENT CAPDEPUY** Géohistorien spécialiste d'histoire globale.

DU 3 AU 13 DÉC. 2022 | AVEC **DOMINIQUE LEGLU**, Directrice éditoriale et **MARIE-CHRISTINE DE WARENGHIEN** Experte de la destination Moyen-Orient a vécu plus de 12 années aux émirats.

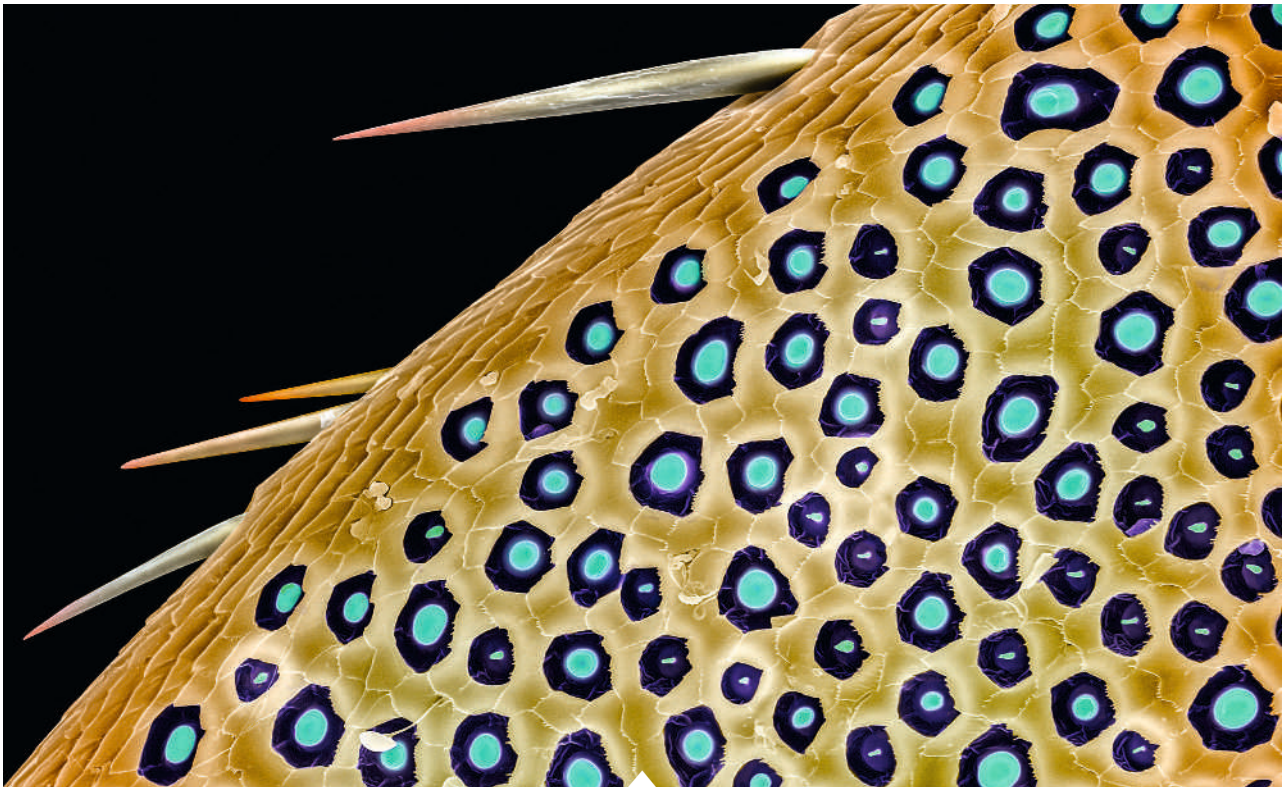
LES POINTS FORTS

Le vol direct PARIS- DJEDDAH / RIYAD- PARIS | Des sites classés au patrimoine mondial de l'Unesco | 3 nuits exceptionnelles au SHADEN resort | L'itinéraire le plus complet proposé | Le trajet en train Jubbah RIYAD | Les vols intérieurs. | Des hôtels sélectionnés (malgré une infrastructure hôtelière pas toujours adaptée) | Un spécialiste de la destination | Des conférences dans vos hôtels.

COLLECTION Infini — Mycomm

SARL Mycomm - 40 avenue Raspail - 94250 Gentilly • Immatriculation Atout France IM094100035 • Assurances Professionnelles by Hiscox - Tourisme Pro n° RCE1006 et n° RC1006-PI0116 • Agence garantie par l'APST • RCS 510 368 400

JACQUES ROSÉS / BIOSPHOTO



HYDE ALEX / SCIENCE PHOTO LIBRARY / SUCRÉ SALÉ

Le hanneton mâle (en haut) détecte les phéromones, des signaux chimiques libérés par les femelles, grâce à ses antennes dont la surface (vue au microscope, en bas) est entièrement couverte de cellules sensorielles (en bleu).

SYNOMONES Molécules favorables à l'émetteur et au récepteur (insectes ou plantes). Par exemple, celles émises par les fleurs pour attirer les pollinisateurs.

ALLOMONES Substances bénéfiques seulement pour l'émetteur. Il en est ainsi de celles émises par des orchidées pour attirer les mâles pollinisateurs.

KAIROMONES Elles sont propices au receveur et défavorables à l'émetteur. C'est le cas d'odeurs émises par les végétaux perçues par des insectes qui mangeront leurs feuilles.

Odorat des insectes

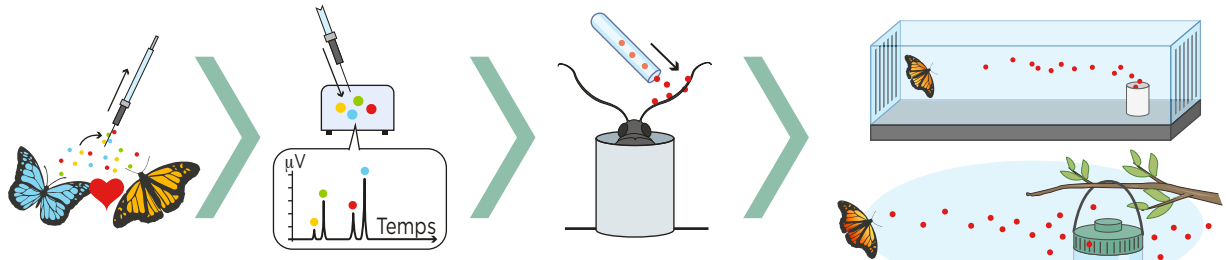
Le comprendre permettra de sauver les cultures

Une meilleure connaissance du « nez » des insectes et l'identification des molécules chimiques qui leur permettent d'entrer en communication avec les plantes aident les chercheurs à mettre au point des pièges olfactifs contre les ravageurs des cultures tout en préservant le vivant. Reportage dans un laboratoire de pointe des Yvelines.

Par Loïc Chauveau @Loic_Chauveau

Près de Versailles (Yvelines), une lutte s'organise. À l'entresol du département d'écologie sensorielle sur le campus de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) de Grignon, des chercheurs mettent au point des solutions pour arrêter les insectes ravageurs les plus redoutables de l'agriculture. Leur modèle : la noctuelle du coton *(Spodoptera littoralis)*, un papillon de nuit qui se nourrit de tomates, pommes de terre ou maïs, entre Afrique et Europe. Présente en Espagne, Italie et Grèce, elle n'est pas encore arrivée en France. Pourtant c'est bien elle qui est cultivée par le laboratoire de l'Institut d'écologie et de sciences de l'environnement de Paris. L'objectif ? Comprendre comment fonctionne son odorat, afin de le tromper. Une piste qui permettrait de protéger les récoltes sans pour autant détruire toute vie autour. Car jusqu'ici, l'agriculture utilise des armes chimiques lourdes, respon-

Quatre étapes pour identifier une phéromone



1 **LORS D'UNE PARADE NUPTIALE,** on prélève des médiateurs chimiques grâce à des filtres absorbants.

2 **LES CONSTITUANTS DU MÉLANGE** sont décelés grâce à une chromatographie en phase gazeuse et une spectrométrie de masse.

3 **L'ÉLECTRO-ANTENNOGRAPHIE** permet d'identifier les composés détectés par les antennes d'un insecte au moyen d'électrodes.

4 **L'EFFET DES MOLÉCULES** est testé en laboratoire dans des tunnels de vol puis leur efficacité est mesurée dans la nature grâce à des pièges attractifs.

sables de la disparition d'un quart des populations d'insectes ces trente dernières années.

À première vue, le « nez » des insectes est bien différent de celui des mammifères. Directrice du département d'écologie sensorielle, Emmanuelle Jacquin-Joly montre les fines antennes de *Spodoptera littoralis*: *« Ses antennes sont couvertes de petites soies, les sensilles, qui ont une longueur de 50 à 100 micromètres (µm) pour un diamètre de 1 à 5 µm, soit dix fois moins qu'un cheveu humain. Les très nombreux pores à leur surface, d'un diamètre de 0,1 à 0,2 µm, sont la porte d'entrée des molécules odorantes.* » Cependant, que l'organe sensoriel soit interne comme le nez humain, ou externe comme les antennes, la traduction de l'odeur en comportement (attirance, répulsion) suit un cheminement commun à toutes les espèces terrestres. Chaque récepteur olfactif est en effet associé à un neurone qui va transmettre un message électrique au cerveau. *« Chez les insectes, le récepteur est lié à un corécepteur et ils vont produire ensemble le signal électrique,* poursuit la chercheuse. *Chez les mammifères en revanche, le récepteur est lié à une protéine qui active une cascade de réactions amenant au signal électrique, preuve que les deux systèmes ont une origine évolutive radicalement différente.* » Et grâce à cette différence, perturber l'odorat d'un lépidoptère ou d'un coléoptère n'affectera pas les autres familles du monde vivant.

CHRISTOPHE LEPETIT POUR SCIENCES ET AVENIR-LA RECHERCHE

La noctuelle du coton, dont les chenilles sont élevées dans des bacs, sert de modèle à Emmanuelle Jacquin-Joly, à l'Inrae, pour déchiffrer l'odorat des insectes ravageurs.

BRUNO BOURGEOIS

Des variations d'odeurs infinies d'une espèce à l'autre

Le séquençage du génome de la mouche drosophile, au début des années 2000, a permis de décrire les premiers récepteurs des « médiateurs chimiques », le nom des odeurs pour les chercheurs. Puis, les progrès de la génomique ont accéléré les découvertes. On connaît aujourd'hui les récepteurs de plus de 70 espèces de papillons, 50 de mouches et 20 de fourmis. Les scientifiques ont ainsi appris que le nombre de récepteurs olfactifs varie de 10 chez le pou à plus de 350 chez certaines fourmis. Cela peut paraître peu, mais en réalité, ces

récepteurs collaborent dans de multiples combinaisons, permettant ainsi de couvrir de larges spectres d'odeurs. Les variations sont par ailleurs infinies d'une espèce à l'autre. Au cours de leur évolution, les insectes se sont en effet adaptés à différentes niches écologiques. Ainsi, l'odorat de la drosophile est-il programmé pour détecter des fruits pourris, celui du moustique pour repérer l'humain et son sang, celui de la noctuelle pour identifier les végétaux dont elle se repaît. *« Cette spécialisation est une chance car on sait que si l'on cible un lépidoptère ravageur par exemple, cela n'affectera pas les hyménoptères bénéfiques qui vivent à ses côtés »*, signale Emmanuelle Jacquin-Joly.

Caractériser la composition de chaque parfum

L'outil olfactif mieux connu, reste à explorer les interactions avec les odeurs. L'obstacle principal est que la nature est saturée de parfums. Chaque organisme a développé son propre langage odorant — fait de phéromones — qui lui permet de reconnaître ses congénères à de longues distances, de suivre une piste, de retrouver facilement des partenaires sexuels. Les animaux comprennent également les messages d'autres espèces, soit pour les éviter, soit pour les détecter afin de s'en nourrir. Mais ce sont les plantes qui émettent le plus d'odeurs. Elles attirent ainsi les auxiliaires — ces insectes qui les protègent en se repaissant de leurs ennemis — et repoussent les ravageurs. Tout cela constitue les messages allélochimiques *(voir les repères p. 55)*.
La nature, surtout au printemps, est donc un mélange de millions d'odeurs. Mais animaux et végétaux ne les perçoivent que partiellement, soit parce que certaines sont produites en plus grande quantité ou sont plus intenses et masquent les plus faibles, soit parce que chaque espèce a spécialisé son « nez » pour ▸

ALTERNATIVE

L'avenir est au biocontrôle

Son principe, qui repose sur des méthodes naturelles, a pour but de réguler les populations d'insectes agresseurs.

Le biocontrôle utilise des méthodes naturelles pour réguler les populations d'insectes. La technique principale consiste à brouiller les phéromones sexuelles pour que mâles et femelles ne puissent pas se rencontrer. Et ça marche ! Le 28 février, le laboratoire d'entomologie Flor'Insectes, en Seine-Maritime, a présenté à quelques dizaines de viticulteurs d'Alsace les résultats de ses inventaires de populations d'insectes après deux années de « traitement » de leurs vignes par confusion sexuelle. Le constat est éclatant : 85 % des insectes récoltés sont des auxiliaires permettant à *Vitis vinifera* de lutter efficacement contre ses maladies. Les phéromones appliquées sur les parcelles sont brevetées par le groupe chimique allemand BASF. *« Nous savons que nous devons réduire drastiquement ces phytosanitaires que nous produisons depuis plus d'un siècle »*, reconnaît Jean-Marc Petat, directeur scientifique de BASF France. Le groupe n'a pour l'instant exploré que la voie de la confusion sexuelle, qui empêche par exemple la tordeuse de la grappe de trouver des partenaires sexuels dès le début du printemps, perturbant ainsi les pontes d'œufs. La diffusion de phéromones ou de kairomones permet également de prévenir les infestations grâce à des pièges trahissant la présence des premiers envahisseurs, voire de détruire une part importante des populations de ravageurs. La technique du *push-pull*, enfin, consiste à semer au sein des parcelles des plantes qui repoussent les insectes et en périphérie des végétaux qui les attirent.

DENIS BRINGARD / BIOSPHOTO

Les diffuseurs de phéromones sexuelles empêchent l'accouplement chez la tordeuse de la grappe.

La pénétration du biocontrôle reste néanmoins très lente. En France, les surfaces traitées sont passées de 20 000 ha en 2010 à 145 000 ha en 2021, principalement sur des vignes et des vergers, pour une surface agricole utile totale de 27 millions d'hectares. *« Le traitement est de 1,5 à 2 fois plus cher que les phytosanitaires et il impose que les exploitants s'entendent pour traiter ensemble de grandes surfaces »*, explique Jean-Marc Petat. Mais la lutte contre le changement climatique et la réduction des pollutions agricoles devraient imposer ces solutions. BASF estime que le biocontrôle représentera 30 % de son activité en 2030.

DÉTECTION

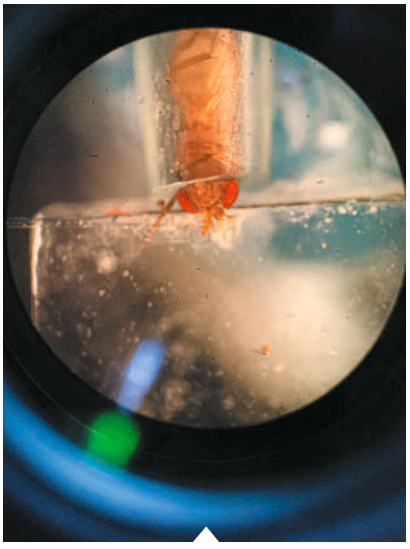
Le charançon rouge trahi par son odeur

Le tueur des palmiers d'ornements du sud de la France, mais aussi des dattiers du monde arabe, est un ennemi redoutable. Le charançon rouge *Rhynchophorus ferrugineus (photo)* colonise les arbres par agrégation : une fois qu'un pionnier a atteint le cœur d'une de ces feuilles géantes, il émet une phéromone qui attire ses congénères. Les larves se développent alors à l'intérieur du palmier, la colonisation est donc invisible pour l'humain. Or les chercheurs de l'Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris ont découvert un récepteur olfactif reconnaissant le signal odorant du charançon. Un prototype de capteur bio-inspiré, utilisant ce récepteur, a été mis au point pour détecter précocement la présence de la phéromone dans l'air et donc l'arrivée des charançons, ce qui permet de traiter les arbres avant qu'ils ne soient infestés. Cette innovation a valu à Emmanuelle Jacquin-Joly un prix international décerné en mars par les Émirats arabes unis.

HUSNI CHE NGAH / BIOSPHOTO

déterminer, à des quantités souvent infimes, des odeurs particulières qui lui sont vitales. Depuis soixante-dix ans, les chercheurs améliorent leurs méthodes pour caractériser la composition chimique de tous ces parfums naturels. La première phéromone à avoir été identifiée est le bombykol, la phéromone sexuelle du papillon du ver à soie (*Bombyx mori),* en 1959 par le biochimiste allemand Adolf Butenandt. Depuis, plus de 1600 substances sexuelles ont été décrites et des millions d'allélochimiques identifiés. *« Ces composés organiques volatils (COV) sont très légers, pouvant ainsi être portés par l'air. Ils sont constitués notamment d'atomes de carbone et d'hydrogène et appartiennent à différentes familles chimiques, essentiellement des terpénoïdes, des benzenoïdes et des dérivés d'acides gras* », détaille Emmanuelle Jacquin-Joly. Les phéromones sexuelles des papillons de nuit, par exemple, sont des dérivés d'acides gras à moyenne et longue chaînes de 12 à 16 atomes de carbone. Chez les pucerons, la phéromone d'alarme la plus commune est un terpénoïde.

Étudier l'effet de toutes les odeurs sur les insectes demeure néanmoins un travail long et fastidieux *(voir l'infographie p. 56). « C'est pourquoi, depuis 2014, nous avons eu l'idée d'une démarche inverse, qui consiste non pas à partir des mélanges odorants complexes ni du comportement de l'insecte, mais des récepteurs olfactifs eux-mêmes, ce qui permet de savoir beaucoup plus rapidement si les molécules font effet ou pas* », se réjouit la scientifique. Cette démarche s'appuie sur des modèles mathématiques, l'intelligence artificielle et l'apprentissage machine *(machine learning)*.

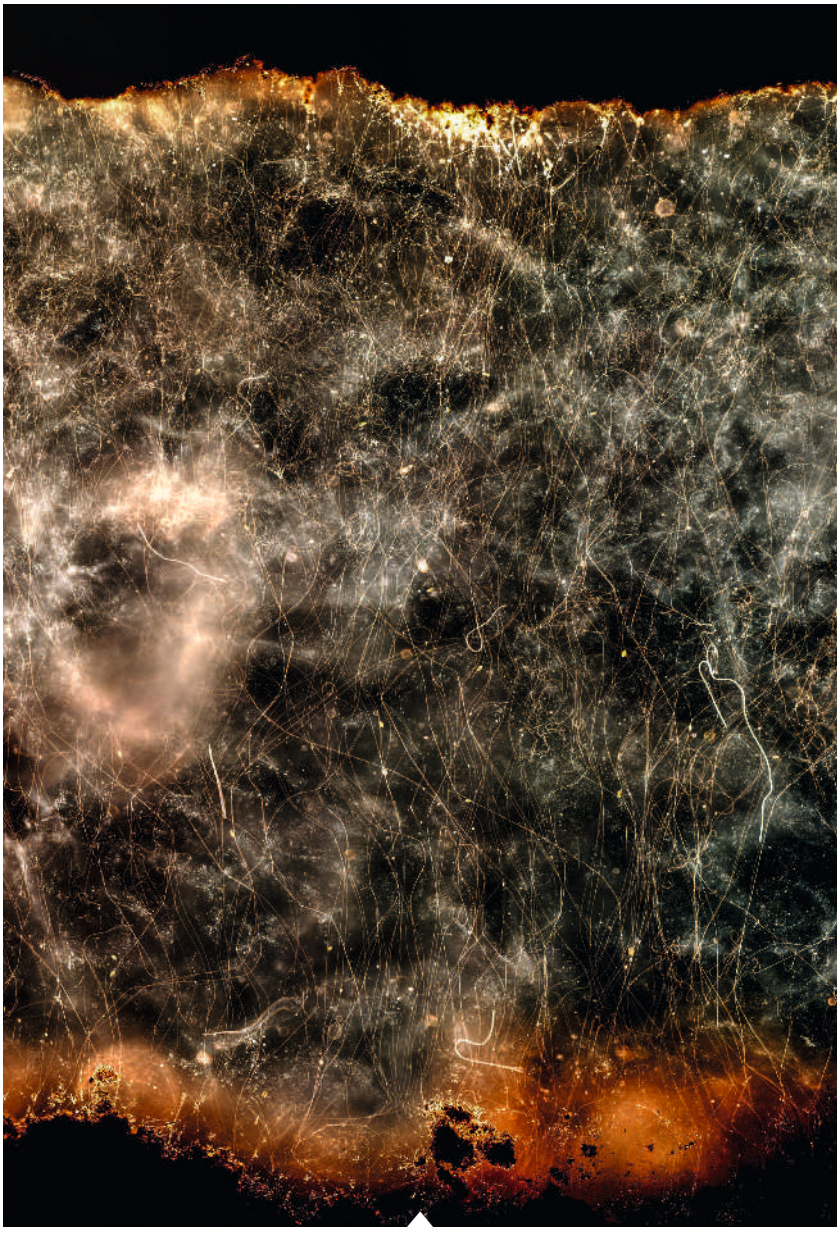

ALIZÉE DELARUE @INRAE

La drosophile génétiquement modifiée (présentée ici tête en bas) sert de modèle aux chercheurs pour tester les substances qui font réagir les récepteurs olfactifs de différents insectes.

3 millions de substances passées au criblage virtuel

En exprimant par des chiffres les propriétés structurales des molécules, les chercheurs criblent par informatique une banque de plus de 3 millions de COV « virtuels », ce qui permet d'identifier bien plus rapidement les substances susceptibles de faire réagir les récepteurs. L'insecte modèle est ici une mouche drosophile, génétiquement modifiée et sur laquelle peut être greffée le récepteur olfactif de n'importe quel insecte. Ne reste plus qu'à enregistrer s'il y a une réaction. *« Grâce à l'apprentissage automatique, elle se produit dans 70 % des cas,* s'enthousiasme la chercheuse. *Et plus vite on définira précisément les messages chimiques des insectes ravageurs, plus vite on pourra diffuser des méthodes de biocontrôle respectueuses de la biodiversité* », résume Emmanuelle Jacquin-Joly. Une véritable course de vitesse est engagée : à la fin de la décennie, l'agriculture devra diminuer de moitié son usage de la chimie. ■

Des câbles vivants vont dépolluer les sols



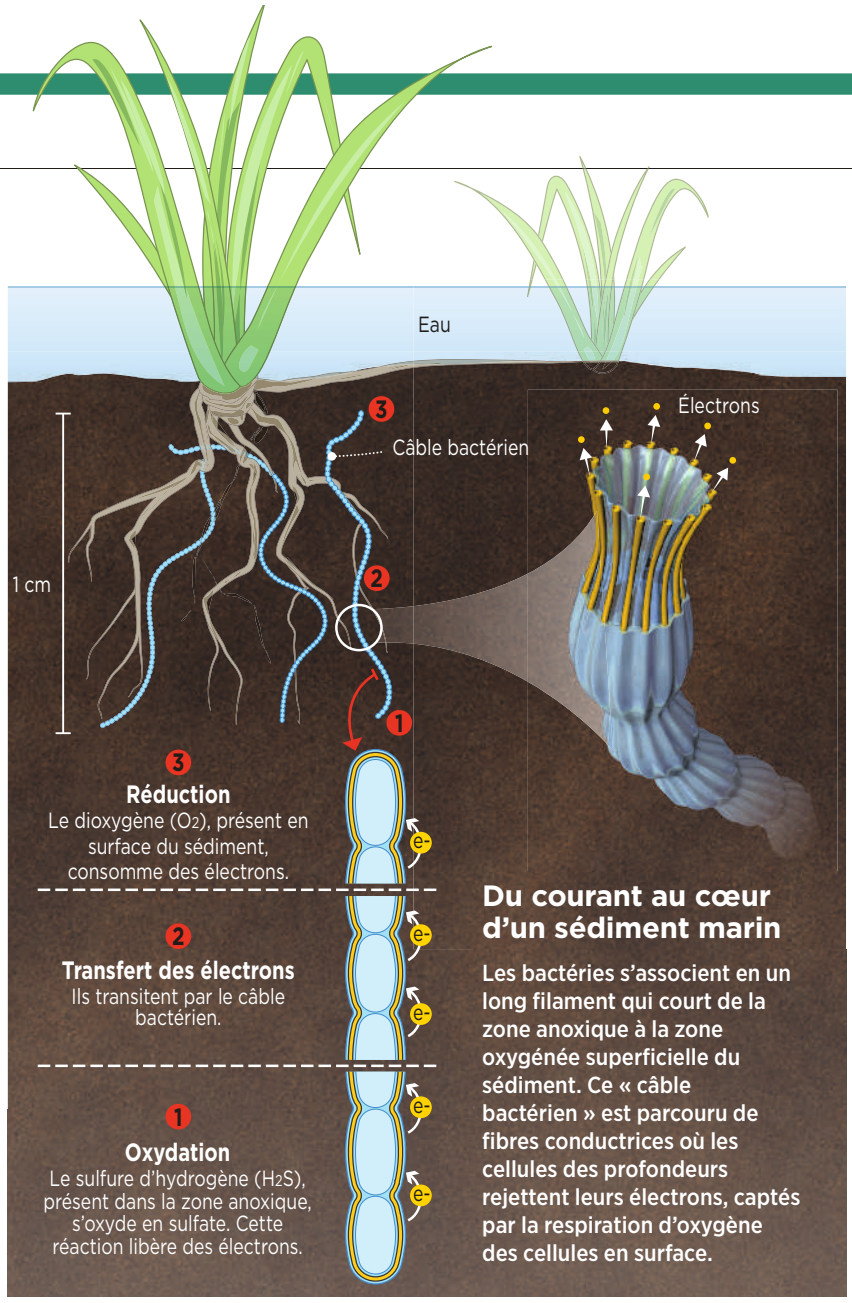
STEFFEN LARSEN/LARS RIIS DAMGAARD

Les filaments formés de bactéries présents dans les sédiments aquatiques transportent des électrons sur une distance de plusieurs centimètres.

Ils assainissent les sédiments aquatiques, dégradent les hydrocarbures et conduisent le courant presque aussi bien que le métal : à peine découverts, les câbles bactériens n'en finissent plus d'étonner ! Rencontre avec ces filaments de microbes pas comme les autres.

Une eau littorale toxique, du méthane relargué par les champs de riz, une marée noire : voici trois pollutions *a priori* sans rapport entre elles, mais qui pourraient être traitées par une approche totalement inédite : le déploiement de « câbles bactériens », des microbes singuliers dont les scientifiques commencent à peine à percer les secrets. « *Les câbles bactériens ne sont connus que depuis dix ans* », raconte Filip Meysman, professeur de biologie à l'université d'Anvers (Belgique) et pionnier de l'étude de ces organismes. Mais depuis leur découverte, ces bactéries de la famille des *Desulfobulbaceae* ont été repérées dans toutes sortes de sédiments aquatiques à travers le monde, avec une densité pouvant atteindre 60 000 filaments par cm² ! « *On les trouve en particulier dans des sédiments riches en matière organique et oxygénés en surface, mais anoxiques* [pauvres en oxygène] *et chargés de sulfure d'hydrogène (H_2S) dissous en profondeur* », détaille Sairah Malkin, professeure de biologie à l'université du Maryland (États-Unis) et spécialiste de biogéochimie aquatique.

Leur originalité ? Ces bactéries vivent uniquement sous la forme de longs filaments de clones, regroupant jusqu'à 10 000 cellules génétiquement identiques par câble. À raison de 3 micromètres (µm) par bactérie, ces chapelets de cellules atteignent 3 cm de long… et conduisent l'électricité ! C'est d'ailleurs cette incroyable particularité qui a permis à Lars Peter Nielsen, professeur de biologie à l'université d'Aarhus (Danemark), de les déceler. *« Au cours d'expériences de biogéochimie, nous avons découvert par hasard que les teneurs en oxygène et en sulfure d'hydrogène évoluaient de concert malgré leur séparation dans des sédiments marins »*, se rappelle Lars Peter Nielsen. L'oxygène, plus précisément du dioxygène (O_2) en surface du sédiment, consommait des électrons — on parle de réduction —, tandis que l'oxydation du sulfure d'hydrogène en sulfate en produisait… quelques centimètres plus bas *(voir l'infographie ci-contre)*. Et la simple diffusion d'électrons à travers le sédiment ne suffisait pas à rendre compte de cette synchronisation. *« La seule manière de l'expliquer était de l'associer à un courant électrique,* poursuit le chercheur. *Et nous avons réussi à démontrer son existence.* » Restait à trouver le matériau conducteur.



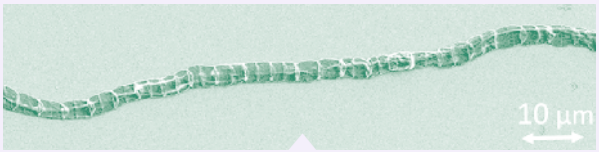
Une répartition vitale des tâches

En 2012, en observant de plus près les sédiments, Lars Peter Nielsen découvre que *« ces fils électriques sont en réalité des bactéries vivantes ! »* Stupeur dans la communauté scientifique : une conduction électrique au sein de cellules vivantes n'avait jusqu'alors été documentée que sur des distances maximales de… 10 µm. Soit 3000 fois moins que la taille des câbles bactériens. En 2019, Filip Meysman a démontré que l'électricité transite à travers le câble bactérien dans un réseau de fibres, dont l'analogie avec les classiques fils de cuivre est frappante *(lire l'encadré p. 61)*. *« Après avoir isolé le réseau de fibres des câbles bactériens, nous l'avons soumis à un courant électrique. Quand j'ai vu les nanoampères apparaître à l'écran, j'ai bondi de ma chaise ! »*, se souvient Filip Meysman. Une fois les câbles bactériens identifiés, restait à comprendre comment leur mode de vie pouvait expliquer cette conduction électrique. C'est chose faite en 2019, grâce à l'analyse de cinq génomes de câbles bactériens qui ont permis, en combinaison avec des données expérimentales issues de souches désormais cultivées en laboratoire, de déterminer leur « régime ». Habitant de part et d'autre de la limite entre surface oxygénée et profondeur anoxique du sédiment, les bactéries qui composent les câbles vivants tirent leur énergie de l'oxydation en sulfate du H_2S, présent dans la zone anoxique. *« H_2S est leur chocolat ! »*, s'amuse Filip Meysman. Et cette réaction libère des électrons. Or, si ceux-ci ne sont pas consommés, ils s'accumulent et finissent par bloquer la production d'énergie. Problème : dans cette partie des sédiments, il n'existe pas de molécules susceptibles de capter les électrons. C'est là qu'interviennent les fibres conductrices. *« Les cellules de la zone anoxique prennent les électrons de H_2S et les envoient* via *les fibres électriques à leurs sœurs en surface, où ils sont captés par l'oxygène,* révèle Filip Meysman. *Dans un*

MÉCANISME

D'étranges fils électriques bactériens

Seule une armature de fibres parallèles conduit l'électricité de bout en bout d'un câble bactérien. Ce réseau frôle les bactéries sans les pénétrer, filant entre la membrane interne délimitant la bactérie et la membrane au contact de l'extérieur. L'intérêt de cette circulation périphérique ? Lorsque les cellules d'un câble se divisent, leurs membranes internes se scindent… mais pas leurs membranes externes.



R. BONNÉ ET AL.

De petites stries apparaissent sur les gaines bactériennes tout comme sur un fil électrique (vues au microscope électronique).

Résultat : toutes partagent la même périphérie. Pour prendre une image, c'est comme si le câble bactérien était une gousse de 90 m de long contenant 10 000 petits pois et dont la paroi interne était tapissée de fils électriques, traversant de haut en bas la gousse sans percer chaque petit pois. Au cœur de chaque fibre, la conduction électrique est assurée par des protéines riches en soufre et en nickel, d'après une publication parue en juin 2021 dans la revue *Nature Communications*. Ce mécanisme de transmission des électrons sur de longues distances reste à élucider. Tout comme nos fils de cuivre, la partie conductrice de la fibre est enveloppée d'une gaine isolante, constituée de protéines encore inconnues. Mais alors, comment les électrons rejetés par les bactéries de la zone anoxique atteignent-ils la partie conductrice ? Le mystère demeure entier.

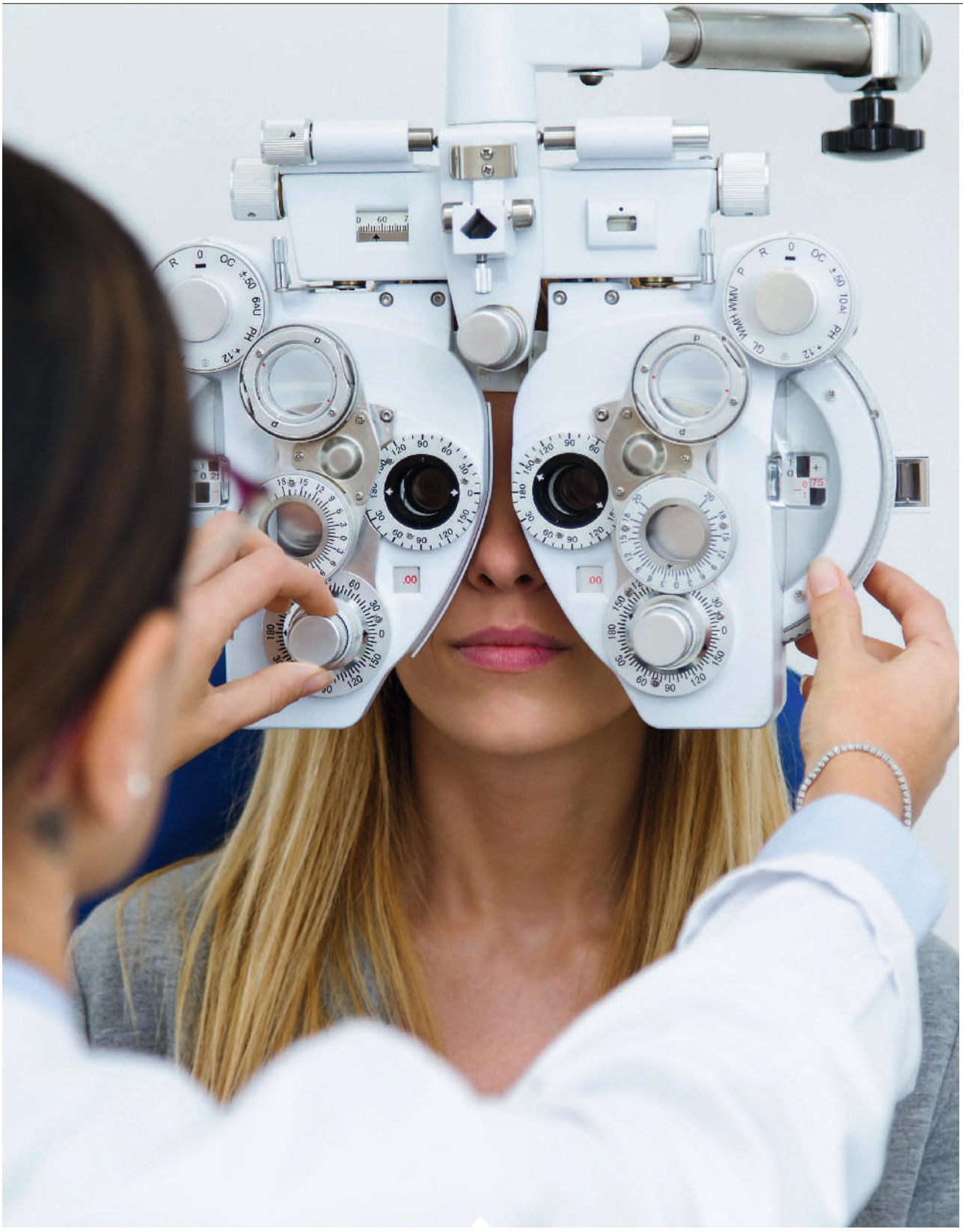
câble, c'est comme si les cellules de la zone anoxique ne faisaient que manger du chocolat, alors que les cellules de surface ne faisaient que respirer. »
Cette répartition des tâches est vitale : quand on coupe le courant en privant le câble d'accès à l'oxygène, les bactéries de la zone anoxique arrêtent de se développer.
Si les cellules des profondeurs prospèrent grâce à cette « connexion filaire » à l'oxygène, ce n'est pas le cas des cellules en surface : privées de leur source d'énergie H_2S, elles se contentent de respirer et de survivre sur les réserves qu'elles ont accumulées avant de pénétrer dans la zone oxygénée. « *Les cellules de la zone oxygénée travaillent pour leurs sœurs sans bénéfices en retour : elles sont altruistes* », s'émerveille Filip Meysman.
Ces particularités métaboliques et structurales sont au cœur des promesses d'applications des câbles bactériens. En consommant le sulfure d'hydrogène des profondeurs, ils empêchent en effet l'empoisonnement des eaux littorales par cette molécule, toxique pour la plupart des êtres vivants. L'oxydation de H_2S en sulfate profite également aux microbes sulfato-réducteurs, des micro-organismes qui s'alimentent en sulfate et prolifèrent si vite en sa présence qu'ils supplantent les microbes méthanogènes, responsables du dégazage de méthane par les champs de riz. Le même type d'action indirecte est à l'origine de leur capacité à accélérer la dégradation des hydrocarbures : « *les câbles bactériens fournissent du sulfate aux microbes sulfato-réducteurs qui oxydent les hydrocarbures* », explique Filip Meysman. Reste à développer une méthode pour les déployer dans les zones polluées.
Les chercheurs se prennent même à rêver à des applications biotechnologiques pour ces fibres électriques. « *À terme nous espérons recréer, puis utiliser ce matériau plus efficace que nos semi-conducteurs actuels et à deux doigts d'être un métal* », annonce Filip Meysman. Et Lars Peter Nielsen de conclure : « *Le fait que nous soyons passés à côté de l'existence des câbles bactériens pendant si longtemps rappelle qu'en science, il faut garder l'esprit ouvert face à l'inexplicable. Il y a encore tant de trésors à découvrir dans la nature.* » ■

François Mallordy

FILIP MEYSMAN

« Les cellules de la zone oxygénée travaillent pour leurs sœurs des profondeurs sans bénéfices en retour : elles sont altruistes ! »

Filip Meysman, professeur de biologie à l'université d'Anvers (Belgique)



GETTY IMAGES

Qualifiée désormais de pandémie par les ophtalmologues en raison de la croissance rapide du nombre de personnes atteintes, la myopie est une affection altérant la vue de loin qui peut être dépistée lors d'un examen clinique.

Myopie

De nouvelles techniques freinent son évolution

Si le pourcentage de myopes ne cesse d'augmenter en France et dans le monde, en raison notamment de nos modes de vie, les traitements pour corriger ce défaut de la vue ont fait des progrès. La recherche investit également dans ce domaine avec l'ouverture prochaine d'un centre national de référence pour les formes les plus sévères.

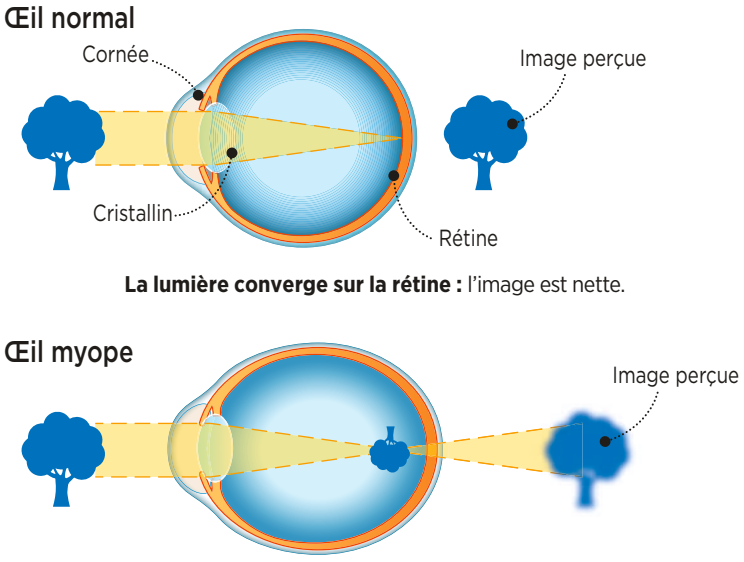
Par Sylvie Riou-Milliot

Enfin ! En 2023, la France aura son premier centre de recherche consacré aux myopies sévères. Porté par la Fondation Adolphe-de-Rothschild, à Paris, cet Institut national de recherche de la myopie pathologique aura aussi à cœur de trouver de nouvelles pistes pour s'attaquer à une épidémie annoncée. Il y a tout juste dix ans, ce terme était déjà employé par l'ophtalmologiste australien de renommée internationale Ian Morgan dans la revue *The Lancet*. En 2015, c'était au tour du journal *Nature* de titrer sur le « myopie boom ». Autant d'alarmes qui reposent sur des données implacables faisant état d'un doublement de la prévalence de la myopie en trente ans : 20 % en 1970, 40 % aujourd'hui, soit 2,6 milliards de personnes, et 5 milliards en 2050 selon des projections récentes. L'accroissement du nombre de personnes souffrant de cette affection liée à un œil trop long *(voir l'infographie p. 64)*, qui se déclare dans l'enfance et altère la vue de loin, est si rapide que le terme même de pandémie est désormais utilisé par les ophtalmologues. Or, si en 2022, on sait parfaitement dépister la myopie (le classique tableau de lettres à lire de loin), la quantifier, la corriger (port de lunettes ou de lentilles) et depuis trente ans l'opérer *(lire l'encadré p. 65)*, ce trouble reste encore mal compris, les mécanismes précis à l'origine du signal déclencheur de l'allongement du globe oculaire n'étant pas totalement élucidés.

De nombreux travaux ont aussi montré que l'apparition de la myopie est de plus en plus précoce dans l'enfance. *« D'où l'importance du dépistage dès l'âge de 3 ans, pas toujours réalisé en pratique »*, insiste le Pr Dominique Brémond-Gignac, cheffe du service d'ophtalmologie à l'hôpital Necker-Enfants malades, à Paris. Les enjeux sont importants. Car si la plupart des myopes sont atteints d'une myopie légère ou modérée (entre -0,5 et -6 dioptries) qui se stabilise souvent vers 25 ans, 5 à 10 % sont affectés de myopie forte (au-delà de -6 dioptries). Il s'agit alors d'une véritable maladie qui évolue tout au long de la vie et expose à des risques de complications précoces (décollement de rétine, glaucome, cataracte…), l'allongement du globe oculaire étirant les différents tissus (rétine, nerf optique).

Mais pourquoi l'œil s'allonge-t-il chez certains de manière excessive ? *« Des facteurs génétiques existent et des gènes de prédisposition ont été identifiés, mais ils ne peuvent expliquer à eux seuls l'explosion aussi rapide de la prévalence de la myopie chez l'enfant,* détaille le Dr Gilles Martin, ophtalmologue à l'hôpital Fondation Adolphe-de-Rothschild. *On sait aujourd'hui que les principaux facteurs sont environnementaux, comme l'augmentation du temps passé en intérieur, la faible sollicitation de la vision de loin et, à l'inverse, celle excessive de la vision de près, tout comme le manque d'exposition à la lumière naturelle.* » Ainsi, passer du temps en extérieur déclenche la synthèse de dopamine, un neuromédiateur ralentissant l'élongation de l'œil. En Asie, où le phénomène est étudié depuis plus de vingt ans (à Taïwan, 90 % des jeunes sont myopes), des mesures ont été prises : davantage de fenêtres dans les classes, plus de temps scolaire et d'activités à l'extérieur… Avec déjà de premiers résultats : moins 10 % de prévalence en dix ans. *« Aucune mesure à la hauteur de ce que les pays asiatiques déploient actuellement n'est évaluée ni mise en place en France à ce jour »*, regrette le Pr Ramin Tadayoni, chef de service d'ophtalmologie à l'hôpital Fondation Adolphe-de-Rothschild. Pourtant, trois axes de prévention existent : de nouveaux verres dits freinateurs, l'usage de lentilles nocturnes ou l'administration de collyres. Revue de détails.

Une élongation excessive du globe oculaire



La lumière converge sur la rétine : l'image est nette.

L'œil a une forme plus allongée. La lumière émise par des sources éloignées converge en avant de la rétine et l'image est floue.

BRUNOBOURGEOIS

Des verres freinateurs de myopie

Freiner l'évolution de la myopie chez l'enfant et ramener la vitesse d'élongation d'un œil myope à la même valeur que celle d'un non-myope : telle est l'ambition affichée de deux nouveaux verres (Stellest du français Essilor, Miyosmart du japonais Hoya). Dits défocalisants ou freinateurs de myopie, ils sont commercialisés en France depuis un peu moins de deux ans et reposent sur deux technologies proches. *« Dans les deux cas, les verriers supposent que la périphérie de la rétine des myopes perçoit des images floues,* explique Dominique Brémond-Gignac. *D'où l'idée d'agir sur cette zone rétinienne périphérique pour corriger ces erreurs de perception.* »

La première technologie dite HALT (Highly Aspherical Lenslet Target), utilisée par Essilor, consiste en 1021 micro-

CORNÉE

Il ne faut surtout pas se frotter les yeux

Frotter ses yeux : ce geste peut sembler banal mais sa répétition peut avoir de graves conséquences sur notre santé visuelle. La mise en garde émane du Dr Damien Gatinel, chef de service d'ophtalmologie à la Fondation Adolphe-de-Rothschild. La pression exercée par les mains peut en effet entraîner une déformation et un amincissement de la cornée conduisant au développement d'un kératocône, une affection à l'origine de symptômes visuels (dédoublements d'images brillantes sur fond sombre, flou visuel persistant), mais aussi un facteur d'apparition ou d'accentuation d'une myopie ou d'un astigmatisme. Mieux vaut donc plutôt traiter la cause (allergies, atopie, fatigue, abus d'écran, poussières…).

INTERVENTION

La chirurgie réfractive, une alternative aux lunettes ou aux lentilles

Dans la majorité des cas, la myopie peut être corrigée en utilisant différentes techniques de laser, en fonction de l'atteinte plus ou moins forte de l'affection.

Chaque année en France, 150 000 myopes optent pour les techniques dites de chirurgie réfractive. Toutes reposent sur l'utilisation de lasers sculptant la cornée au micromètre près. Cette partie antérieure transparente qui recouvre l'œil, devant l'iris et la pupille, a pour rôle de transmettre la lumière au cristallin et à la rétine. Et c'est sur sa courbure que les chirurgiens interviennent, en la modifiant plus ou moins en profondeur, au centre et en périphérie. *« Une cornée mesure 550 micromètres et notre fourchette d'intervention est au maximum de 20 % d'ablation, soit environ moins 100 micromètres »*, précise le Pr Alexandre Denoyer, chirurgien ophtalmologue au CHU de Reims. Apparue dans les années 1990, la technique pionnière est le laser à excimère, suivie du Lasik (Laser-Assisted In-Situ Keratomileusis) *(Lire S. et A. n° 706, n° 828)*. Mais depuis dix ans, le Lasik perd du terrain au profit d'autres approches plus récentes, avec des lasers plus maniables : *« Smile (Small Incision Lenticule Extraction) et plus récemment la Trans PKR (photokératectomie réfractive transépithéliale), la seule 100 % laser, sans aucun contact d'instrument avec l'œil »*, résume le spécialiste. Cette diversité de techniques permet de s'adapter aux situations : Lasik ou PKR pour des myopies faibles (de -0,25 à -2,5 dioptrie), Lasik ou Smile pour les moyennes ou trans PKR dans la plupart des cas. Mais tous les myopes ne sont pas opérables, avertit l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM). Car même si la technique est efficace (moins de 1% de réinterventions, peu de complications), il faut attendre environ l'âge de 25 ans, âge moyen de stabilisation de la myopie et également respecter les contre-indications, par exemple une cornée trop fine. D'où l'importance de s'adresser à un chirurgien expérimenté qui réalisera un bilan préopératoire complet avec examen précis de la cornée, la topographie cornéenne, permettant d'évaluer son épaisseur, sa régularité… De plus, pour les myopies sévères (au delà de -8 dioptries), pas de lasers mais une alternative possible : le recours à des implants souples ou rigides, posés en avant du cristallin qui, selon l'âge du patient, demeure en place ou non. Ces gestes, plus à risque que les techniques laser, restent rares, avec moins de 5 % des actes chirurgicaux. Dans tous les cas, cette chirurgie n'est pas remboursée et coûte environ 1500 euros par œil. *« Reste à améliorer les approches pour les myopes de plus de 40 ans et pouvoir agir à la fois sur la vision de loin et de près »*, conclut le chirurgien.

VOISIN/PHANIE

Les lasers interviennent sur la courbure de la cornée en la sculptant au micromètre près.

lentilles invisibles réparties en anneaux et en périphérie de la lentille. Dans la seconde commercialisée par Hoya, DIMS (Defocus Incorporated Multiple Segments), ce sont plusieurs centaines de segments dits de défocalisation qui sont intégrés à la lentille pour obtenir la même correction. Pour l'instant, les essais cliniques ont montré que la freination obtenue sur trois ans est d'environ 60 % chez un enfant myope. « *Soit une évolution à -4 dioptries au lieu de -10, ce qui est un très bon résultat* », se réjouit la spécialiste, avant d'alerter sur les limites des études : « *Elles n'ont été réalisées que chez des enfants asiatiques, chez qui les facteurs génétiques et environnementaux sont très différents.* » C'est la raison pour laquelle Dominique Brémond-Gignac a commencé en février 2020 une étude sur les verres Miyosmart avec des enfants vus en consultation en France. Environ 200 jeunes de 4 à 16 ans seront suivis pendant deux ans.

Des lentilles à porter la nuit

Alternative au port de lunettes de jour, celui de lentilles la nuit. Cette approche, dite d'orthokératologie, est limitée aux myopies faibles à moyennes chez l'enfant. Le principe est d'induire un changement de forme de la cornée en aplatissant pendant au moins six heures le centre de celle-ci. Il s'agit d'un remodelage purement mécanique utilisant les forces appliquées par des lentilles. Celles-ci sont conçues dans des matériaux permettant une bonne oxygénation de la cornée. Des études ont montré que ce port nocturne permettait de se passer de lunettes le jour, mais pouvait aussi ralentir l'évolution de la maladie. « *Elle nécessite toutefois une bonne coopération de l'enfant à partir de 7 ans et peut séduire les sportifs et les motivés, à condition qu'ils soient accompagnés par leurs parents pour le protocole d'hygiène de pose en raison du risque d'infection* », détaille Dominique Brémond-Gignac. « *Cette approche, plus coûteuse que les lunettes (environ 200 euros par mois) est davantage utilisée dans les pays anglo-saxons qu'en France, peu d'ophtalmologues étant formés à l'orthokératologie* », précise Gilles Martin.

ZHOU CHAO/XINHUA/REA

De nombreuses mesures ont été prises en Asie, où la myopie est étudiée depuis vingt ans. Ici, des écoliers chinois sont équipés de supports pour écrire à la bonne distance.

PRÉVENTION

Conseils pratiques pour les enfants

La myopie touche de plus en plus d'enfants dans le monde. Afin de prévenir cette affection, quelques réflexes simples sont à adopter. Il faut encourager les enfants à passer au moins deux heures par jour en extérieur, la lumière du jour étant bénéfique pour les yeux et l'organisme en général et limiter l'usage des écrans. Ils doivent pouvoir lire, travailler dans de bonnes conditions d'éclairage, de posture et à bonne distance (au moins 40 cm). Demander à l'enfant de cligner régulièrement des yeux. C'est la règle du 20/20 : une pause de 20 secondes toutes les vingt minutes pour porter le regard au loin en fixant un objet durant 20 secondes. Enfin, un dépistage dès l'âge de 3 ans (orthoptiste, ophtalmologiste) est fortement recommandé.

Des gouttes tous les jours

La troisième piste consiste à instiller quotidiennement dans les yeux des gouttes à base d'atropine, le principe actif issu de la belladone, pour dilater la pupille. « *Le mécanisme d'action, mal connu, passe par certains récepteurs mais aussi sans doute par l'étirement des fibres locales de collagène* », note Dominique Brémond-Gignac. Plusieurs études asiatiques ont prouvé son efficacité à faible concentration (0,01 à 0,05 %) pour ralentir la progression de la myopie. « *Mais il n'y a pas encore de consensus sur l'exacte concentration efficace,* signale Gilles Martin. *Non disponible en pharmacie, ce collyre est fabriqué à la demande des ophtalmologues par les pharmacies hospitalières.* » Gilles Martin pilote par ailleurs depuis octobre 2021 une étude originale, Atrosmart, visant à comparer les nouveaux verres dits défocalisants au collyre. Elle doit inclure 240 enfants de 4 à 14 ans et durer au moins deux ans. Quelle que soit la stratégie de freination utilisée, une question majeure persiste : celle de la durée du traitement, certaines études ayant rapporté un effet rebond au moment de l'arrêt. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

- Le site de l'Association de lutte contre la maculopathie myopique : **sciav.fr/903amam**
- Les différentes techniques de chirurgie réfractive présentées par l'ANSM : **sciav.fr/903chirurgie**

Toulouse School of Economics

Challenges

Les Echos Le Parisien ÉVÉNEMENTS

Sauver le bien commun

Chapitre II

Vieillissement

Climat

Numérique

Transport

Inflation

COMMON GOOD SUMMIT

19 - 20 mai 2022

Photo : Bruno Levy - Challenges

Edito

La guerre est aux portes de l'Europe, le Covid-19 continue de faire de l'ombre à la reprise économique actuelle et les difficultés structurelles de nos sociétés, antérieures à la pandémie et à la guerre, sont toujours présentes.

Pour trouver ensemble des solutions à ces défis majeurs, je vous donne rendez-vous les **19 et 20 mai 2022.**

Avec des leaders industriels et politiques ainsi que certains des plus brillants économistes mondiaux, nous croiserons les points de vue et dessinerons ensemble une feuille de route sur **le défi climatique, le retour de l'inflation, la révolution des transports, le bouleversement de l'économie du vieillissement ou encore l'essor de l'intelligence artificielle.**

Vous avez été des milliers à suivre nos débats l'an dernier, faisant de cette première édition un immense succès, je vous en remercie profondément et vous invite à transformer l'essai et à nous rejoindre en mai prochain, à Toulouse ou en digital, pour le Chapitre II du Common Good Summit.

Jean Tirole,
Toulouse School of Economics.

INSCRIPTION **GRATUITE** SUR

CommonGoodSummit.com

#commongoodsummit

PARTENAIRES OFFICIELS : amazon, AXA, BIEN COMMUN ADVISORY, BNP PARIBAS, Domus, ExxonMobil, GETLINK, LVMH, Pierre Fabre, Région Occitanie, SFA, toulouse métropole, transdev

PARTENAIRE : WHITE & CASE

PARTENAIRES MÉDIAS : Challenges, SCIENCES AVENIR

PART. ASSOCIÉS : LA DÉPÊCHE

ORGANISÉ PAR : Les Echos Le Parisien ÉVÉNEMENTS

PHILIPPE SANSONETTI
MICROBIOLOGISTE, PROFESSEUR À L'INSTITUT PASTEUR, À PARIS

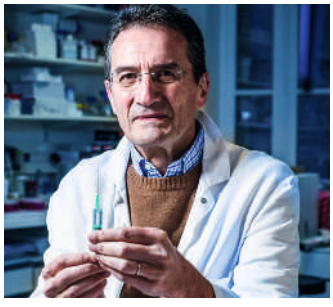
« La fin de la pandémie n'est pas synonyme de fin de crise »

Spécialiste des maladies infectieuses, Philippe Sansonetti suit l'évolution de la pandémie de Covid-19 depuis deux ans. S'appuyant sur des exemples du passé, il rappelle que la prudence reste de mise quant à la déclarer terminée.

Les pays européens ont réduit les contraintes, d'autres comme l'Australie ont rouvert leurs portes : serait-ce bientôt la fin de la pandémie de Covid-19 ?

Philippe Sansonetti : C'est délicat de répondre. Tout d'abord, le mot « pandémie » correspond à une situation particulière : c'est une épidémie majeure qui touche de nombreuses régions du monde, qui a une forte dynamique de progression, qui cause une morbidité et une mortalité d'ampleurs exceptionnelles, et de ce fait des impacts sanitaires, socio-économiques et sociologiques majeurs.

C'est l'Organisation mondiale de la santé (OMS) qui décrète cet état *« d'urgence de santé publique de portée internationale »*. Et c'est encore l'OMS qui en annonce la fin. Pour le moment, elle ne l'a pas fait. Elle reste vigilante : le virus Sras-CoV-2 nous a déjà surpris avec ses variants. Il y a des zones géographiques comme l'Afrique où la dynamique de la pandémie demeure énigmatique, de nombreux pays à faibles revenus où le niveau de vaccination reste très peu élevé. Déclarer trop tôt la fin d'une pandémie peut être catastrophique en raison de son possible effet de démobilisation des populations touchées et de leurs autorités sanitaires.



SÉBASTIEN LEBAN/DIVERGENCE

BIO EXPRESS

- **1949 :** Naissance à Paris.
- **1978 :** DEA de biochimie et de microbiologie.
- **1979** Doctorat de médecine.
- **1983-1987 :** Chargé de recherche et praticien hospitalier à l'Institut Pasteur.
- **1989 :** Création et direction de l'unité de pathogénie microbienne moléculaire, composante de l'unité Inserm 199.
- **2008-2020 :** Professeur au Collège de France (chaire de microbiologie et maladies infectieuses).
- **2012 :** Grand Prix de l'Inserm.
- **2020 :** Parution de *Tempête parfaite. Chronique d'une pandémie annoncée* (Seuil).

Est-ce que cela s'est déjà produit auparavant ?

L'OMS a déjà été échaudée par le passé : lors de l'épidémie d'Ebola, qui a sévi en 2014-2015 en Afrique de l'Ouest, elle a dû revenir trois fois sur son annonce… Cela invite à rester prudent, et pour ce qui concerne le Covid-19, l'hétérogénéité énorme de la situation actuelle n'incite pas à des déclarations trop hâtives.

Cela dit, l'histoire nous montre que les populations finissent par « apprivoiser » la pandémie et « vivre avec le virus ». Certaines populations n'attendent pas l'OMS pour décider, plus ou moins collectivement, que l'épidémie est « terminée ». Ce qu'il faut maintenant, c'est bien gérer cette transition et expliquer qu'une éventuelle fin de l'état de pandémie n'est pas synonyme de fin de crise…

ATUL LOKE/PANOS-REA

Si la vaccination est nécessaire pour enrayer une pandémie (ici, injection du vaccin contre le Covid-19 en Inde), d'autres critères entrent en compte pour y mettre fin.

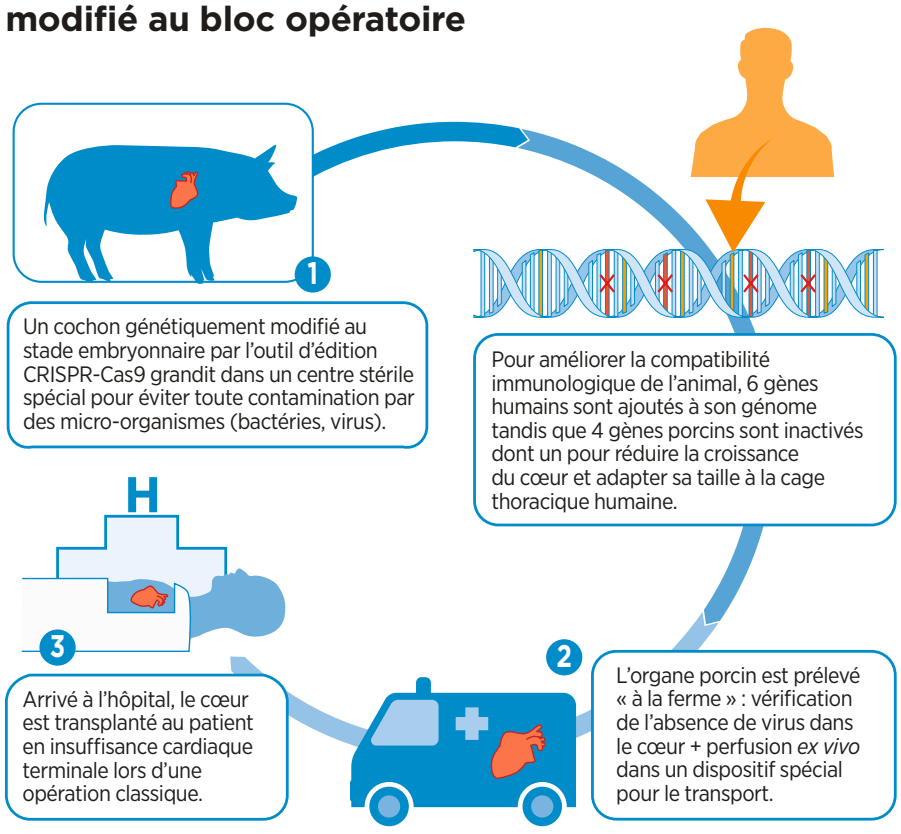
Mais la baisse de la virulence du virus, qui semble s'atténuer au fil de ses mutations, ne donne-t-elle pas des raisons d'espérer ?
Oui, le variant Omicron marque peut-être une étape importante vers une situation plus « apaisée » sur le plan sanitaire. Il est en effet moins virulent, et du fait de sa forte transmissibilité, il aura probablement favorisé une augmentation de l'immunité naturelle dans les populations infectées. En parallèle, les campagnes de vaccination ont contribué à la baisse des cas graves dans les pays occidentaux. Cependant, nous ne sommes pas à l'abri de l'émergence d'un nouveau variant ayant une virulence plus élevée qu'Omicron, même si la tendance évolutive du virus semble faire pencher la balance des génotypes variants sélectionnés vers plus de transmissibilité et moins de virulence.

Comment, en 2004, l'épidémie de Sras-CoV a-t-elle été stoppée ?
L'épidémie a été étouffée grâce à l'application de mesures barrières très strictes. À l'époque, il n'y eu ni traitement, ni vaccin. Mais le virus Sras-CoV causait une maladie de profil évolutif différent. Sa virulence était supérieure à celle de Sras-Cov-2, causant un taux de mortalité très élevé, en moyenne de 10 %. Cependant, sa transmissibilité était limitée à l'acmé de l'infection, moment où le patient était déjà hospitalisé et à l'isolement. Il n'y avait pas de transmetteurs asymptomatiques comme avec le Covid-19. En appliquant rigoureusement la règle « tester-tracer-isoler », l'épidémie a été interrompue dans l'ensemble des 25 pays touchés. La pandémie, grâce à cette approche proactive, n'a duré que quatre mois. 8000 cas ont été comptabilisés dont 800 décès. Rien à voir donc avec le Covid-19, ce qui montre que des virus très proches peuvent donner lieu à des profils pandémiques très différents.

Les épidémies telles que la variole ont, elles aussi, été endiguées : quelles stratégies ont été adoptées ?
Trois critères permettent de mettre fin aux épidémies. Le premier, ce sont les symptômes. Il faut que le malade présente des symptômes clairs afin que l'on puisse le diagnostiquer ainsi que ses contacts. Pour la variole, le tableau clinique était évident : les malades, en grande majorité des enfants, présentaient des pustules et une fièvre très élevée. Le deuxième critère est l'absence de réservoir animal ou environnemental pour le virus responsable. Sinon, celui-ci peut resurgir. Enfin, il faut disposer d'un vaccin très efficace et que l'agent pathogène ciblé soit assez stable. Pour la variole, tous ces critères étaient réunis.

Un virus stable sans réservoir, des symptômes clairs, un vaccin efficace : les critères ne sont pas réunis pour le Covid-19, alors comment faire ?
Restons optimistes, avec la combinaison des mesures barrières et de la vaccination, nous pouvons réduire le taux de reproduction du virus, le maintenir en dessous du seuil épidémique (c'est-à-dire un $R_0 < 1$). À ce moment-là, nous ne serons plus en situation de pandémie, mais seulement en situation endémique, avec l'apparition de foyers locaux limités. Cependant, le risque de résurgence est toujours là, d'autant plus que l'immunité conférée par la vaccination n'est pas assez longue. Et on ne peut pas envisager de se revacciner tous les trois mois… ■ **Propos recueillis par Mathias Germain**

Du cochon génétiquement modifié au bloc opératoire



INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS - PHOTO : DERMOT TATLOW/PANOS-REA POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

La révolution des greffes d'organes issus d'animaux

Un Américain a vécu deux mois avec un cœur de porc génétiquement modifié pour le rendre compatible avec le système immunitaire humain. Une première qui confirme les promesses de la xénogreffe. De quoi pallier à terme la pénurie de greffons humains.

MUHAMMAD MOHIUDDIN

DIRECTEUR DU PROGRAMME DE XÉNOTRANSPLANTATION CARDIAQUE
À L'UNIVERSITÉ DU MARYLAND (ÉTATS-UNIS)

« Les xénogreffes sont le futur de la transplantation »

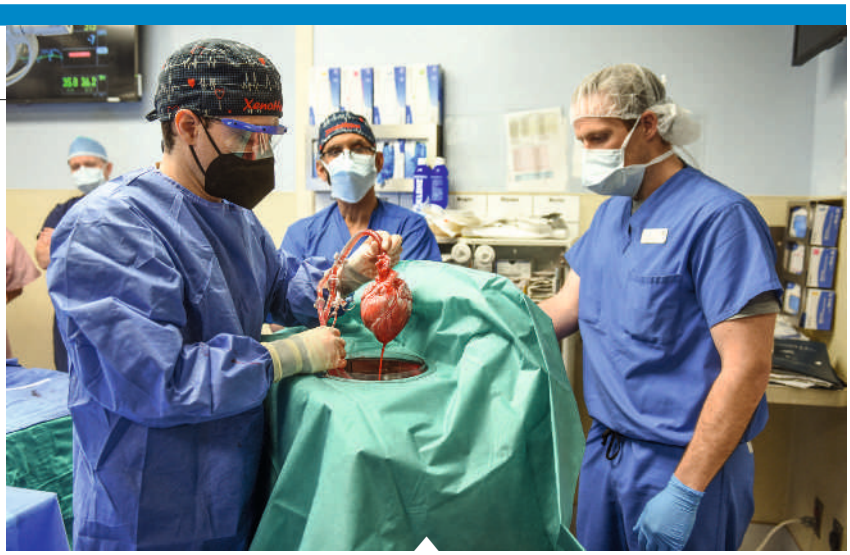
Comment se portait votre patient greffé d'un cœur de cochon « OGM » avant de succomber ?
Je ne peux pas entrer dans les détails car notre article scientifique est en cours de validation. Mais après un mois de récupération postopératoire, il était en mesure de sortir du lit, s'asseoir sur une chaise, bouger les bras et la tête, et suivait trois séances par jour de physiothérapie pour renforcer ses muscles très affaiblis par sa période d'insuffisance cardiaque extrême. Le cœur, lui, ne montrait pas de signes typiques de rejet, mais les traitements immunosuppresseurs utilisés l'ont rendu sujet à des infections répétées.

Les dix modifications génétiques apportées à l'animal donneur n'ont donc pas suffi à résoudre la compatibilité immunitaire ?
L'idéal serait de se passer de ces médicaments supprimant l'immunité. Mais nous n'avons pas encore découvert toutes les causes du rejet. Même avec ce cochon génétiquement modifié, ces traitements restaient indispensables. Nous continuerons à apprendre, à modifier, ajouter ou supprimer des gènes jusqu'à pouvoir éliminer complètement l'immunosuppression.

Est-ce vraiment la stratégie d'avenir ?
En ce moment même, d'autres équipes sont en attente d'autorisation pour des essais avec d'autres organes. Et nous espérons entamer une série de nouveaux essais l'année prochaine. Les xénogreffes sont le futur de la transplantation, j'en suis convaincu. En résolvant le problème de la pénurie de greffons, nous pourrions même remplacer l'organe des malades avant qu'il ne soit complètement défaillant. Car lorsque le cœur est en insuffisance terminale, tous les autres organes en souffrent et affaiblissent l'état général des patients qui ont plus de difficulté à récupérer. Le potentiel est gigantesque. ■

Propos recueillis par Nicolas Gutierrez C.

Cette fois, la xénogreffe a vraiment pris. Elle a tenu 61 jours exactement. Du 7 janvier au 8 mars, David Bennett, un Américain de 57 ans en insuffisance cardiaque terminale, a vécu avec un greffon « étranger » (*xénos*, en grec) d'origine animale : un cœur de cochon. Un record pour un cœur non humain, qui aura résisté aux rejets ayant sanctionné — presque — toutes les autres tentatives : cochons, singes, chèvres, lapins… Cette incompatibilité des greffons animaux avec le système immunitaire humain est pourtant la problématique historique de la xénotransplantation, dont l'objectif est de disposer de greffons à la demande face à la rareté des organes humains. Mais anticorps et cellules immunitaires, formés à combattre le *xénos* justement, sont réticents. Dans le cas de David Bennett, le rejet n'est pas la cause du décès selon Bartley Griffith, directeur clinique du programme de xénotransplantation cardiaque à l'hôpital de l'université du Maryland à Baltimore (États-Unis) : *« Il n'a pas pu surmonter […] l'affaiblissement général dû à sa période précédente d'insuffisance cardiaque, qui était extrême.* » L'organe lui-même *« fonctionnait comme une "rock star", très bien »*, s'est-il même risqué à dire à l'annonce du décès. Muhammad Mohiuddin, le chirurgien qui l'avait opéré, nous a confirmé que *« le cœur n'avait montré aucun signe typique de rejet » (lire l'interview ci-dessus)*.
La clé de cette prouesse inédite réside dans la nature du cochon utilisé pour la greffe : il avait été génétiquement modifié pour rendre le greffon porcin davantage compatible avec le système immunitaire humain. C'est l'œuvre de la société américaine Revivicor, qui se spécialise depuis 2003 dans l'élevage de cochons pouvant être utilisés en médecine humaine. Avec peu de réussite… jusqu'à l'avènement en 2012 de CRISPR-Cas9, technique révolutionnaire qui fait de l'édition génétique de précision une quasi-routine pour les laboratoires. *« CRISPR-Cas9 a fait changer de paradigme,* explique le Pr Pascal Vouhé, expert en chirurgie cardiaque pédiatrique et chargé des xénotransplantations pour l'Académie de médecine. *Sans cet outil, on ne serait guère plus avancé aujourd'hui.* » Pas moins de dix modifications génétiques ont été apportées par Revivicor à son espèce de cochon « Uheart ». D'abord, la suppression de trois gènes programmant la production des molécules de glycane,


UNIVERSITY OF MARYLAND SCHOOL OF MEDICINE / AFP

Les chirurgiens lors de l'opération de transplantation d'un cœur de porc « OGM » sur David Bennett, au centre médical de l'université du Maryland (États-Unis), le 7 janvier.

sucres présents sur toutes les cellules de porc et contre lesquels les humains disposent d'anticorps féroces. C'est d'eux que vient le « rejet hyperaigu », quasi immédiat. Un quatrième gène impliqué, lui, dans la croissance du myocarde porcin a aussi été supprimé pour limiter la taille de l'organe et faciliter sa transplantation dans la cage thoracique humaine. Enfin, l'ajout de six gènes pour produire des molécules humaines améliorant la compatibilité immunitaire… Une quarantaine de profils génétiques différents peuvent ainsi être créés. *« L'annonce de l'université du Maryland était attendue »*, rappelle Pascal Vouhé. En effet, des cœurs de cochon « OGM » sont à l'essai depuis 2016 sur des babouins à Boston ou encore au Gene Center de Munich (Allemagne). Or, certains ont survécu près de trois ans ainsi.

Comprendre le rejet de greffe

On est loin du plus ancien rapport connu de xénogreffe, établi en France en 1905 dans la *Revue médicale* par M. Princeteau, qui avait inséré des tranches de rein de lapin chez un enfant souffrant d'insuffisance rénale. *« Les résultats immédiats ont été excellents,* écrit-il, *le volume d'urine a augmenté, les vomissements ont cessé […] Le seizième jour, l'enfant est mort de congestion pulmonaire. »* Les tentatives furent nombreuses durant les deux premières décennies du XX^e^ siècle, avant que les bases immunologiques du rejet de greffe commencent à être établies. La communauté scientifique se désintéressa alors de la question : le défi était trop élevé, le système immunitaire trop mystérieux. L'objectif renaîtra à la faveur d'une meilleure connaissance de l'immunité et, surtout, du succès de la transplantation humaine. En 1964, à l'université Columbia de New York, une série de 12 greffes de reins de chimpanzés est faite sur des patients avec des taux de survie variables, jusqu'à neuf mois pour une femme de 23 ans qui avait même pu reprendre son travail d'institutrice. Autre opération notable, celle de « Baby Fae », aux États-Unis encore, greffée le jour de sa naissance en 1984 d'un cœur de babouin pour une hypoplasie du cœur gauche et qui survécut 33 jours. Ces deux exemples avaient l'avantage technique de recourir à des organes de primates, plus proches de l'humain donc.

Mais pour des raisons éthiques et pratiques, c'est le cochon génétiquement modifié qui constitue désormais le futur du « don » d'organe. *« Après cette étape majeure, je suis convaincu que ces stratégies vont se développer »*, parie Pascal Vouhé. En France, environ 5000 personnes vivent aujourd'hui avec un greffon de cœur, mais plus de 300 personnes restent en attente chaque année selon l'Agence de biomédecine. Las, aucune investigation n'est menée dans l'Hexagone, alors que la recherche médicale avance à grand pas. *« Certaines équipes américaines sont déjà prêtes à greffer des cœurs chez des nouveau-nés »*, confie Pascal Vouhé. Une piste pour traiter l'hypoplasie du cœur gauche, une malformation critique — 200 naissances par an en France. *« Les nouveau-nés sont de plus de meilleurs receveurs : l'immunité est immature et accepte plus facilement l'organe, étranger ou non. »* En théorie, l'opération pourrait se doubler d'une greffe de moelle osseuse ou de thymus de cochon « OGM », organes-fabriques des cellules immunitaires, de façon à solidifier la comptabilité immunitaire entre les deux espèces. En attendant de réussir à cultiver des organes humains *(lire l'encadré ci-contre)*, ceux des cochons permettront déjà à des patients de survivre. ■ **Hugo Jalinière**

@hugojaliniere

CHIMÈRES

Des organes humains cultivés chez l'animal

Le graal de la transplantation serait de faire pousser des organes humains… dans des organismes animaux ! C'est l'un des objectifs des cultures d'embryons-chimères, des embryons animaux auxquels sont greffées des cellules souches humaines. Un casse-tête de bio-ingénierie puisqu'il faut comprendre comment s'amorce le développement du cœur ou du rein au stade embryonnaire pour inactiver le processus puis le remplacer par des cellules humaines. C'est en ce sens qu'au printemps 2021, les équipes du Salk Institute for Biological Studies, à San Diego (États-Unis), annonçaient avoir cultivé des embryons singe-humain. La plupart des expériences menées, en Chine notamment, concernent toutefois l'embryon de porc. En effet, en replaçant l'embryon dans l'utérus d'une truie, le porcelet à naître pourrait un jour être porteur d'un organe compatible avec le receveur en attente. Et mettre fin à la pénurie des greffons.

Télomères et longévité

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

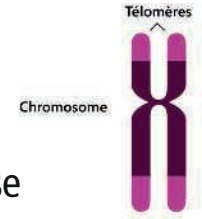
Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

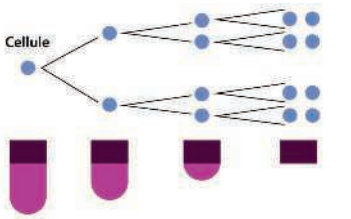
Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase





Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par provoquer la mort de la cellule, appelée sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

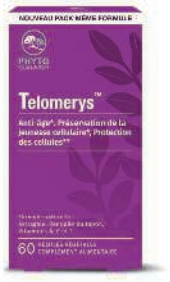
Astragale et télomères,

Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifiques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffisent pour constater une diminution significative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Des conseils ?

Les experts du Laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au **01 85 42 38 51** et sur www.telomerys.com

Telomerys™ : Préservation de la jeunesse cellulaire



Disponible en pharmacie

Telomerys 60 gélules végétales est disponible grâce au code ACL 602 42 56

Salade bien composée vaut déjeuner

Elle peut constituer un véritable repas complet, à la fois sain et équilibré, à condition de choisir des aliments de qualité et de se méfier des salades industrielles.

César, océane, niçoise… Dès que le soleil est de retour, les salades composées, dites aussi salades repas, deviennent les stars de la pause déjeuner et du *snacking*, portées par les marques des distributeurs et des leaders du marché (Sodebo, Daunat et Mix Buffet). En 2020, ces produits vendus au rayon traiteur frais des magasins affichaient un chiffre d'affaires de 827 millions d'euros, très loin devant les sandwichs (406 millions d'euros) et les *snacks* chauds (burgers, hot dogs, etc., 185 millions d'euros) (1), avant que les différents confinements et l'essor du télétravail ne fassent chuter le marché. En entrée ou en plat principal, industrielles ou faites « maison », elles offrent *a priori* la promesse d'un repas sain et équilibré. Mais attention néanmoins à ne pas commettre d'impairs lors de leur achat ou préparation, en choisissant des aliments de qualité.

Une base de salade verte…

Composée à 95 % d'eau et très peu calorique (15 kcal/100 g), la salade verte apporte des minéraux tels le fer (1 mg/100 g de laitue romaine), le calcium (160 mg/100 g de roquette) et des vitamines : B9 (142 microgrammes/100 g de scarole), C (15 mg/100 g de roquette) et K (298 microgrammes/100 g de frisée) (2). La mâche et le pourpier représentent une source d'acide gras alpha-linolénique (ALA) ou oméga-3. Elle peut être accompagnée de légumes, crus ou cuits, ou de fruits. Une consommation de trois à quatre portions par jour de végétaux

33 %

des ventes de *snacking* concernaient des « salades-repas » en France en 2021. Les sandwichs représentaient 41 % des ventes et les burgers, 31 %.

(SOURCE : CHD EXPERT/ÉTUDE SPEAK SNACKING, 2021.)

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

SNACKING Ce terme se réfère au prêt-à-manger, à tout ce qui peut être consommé sur le pouce, comprenant aussi bien les sandwichs, les hot dogs que les plats préparés.

FÉCULENT Aliment d'origine végétale (céréales, légumes secs, pommes de terre) constitué dans une forte proportion d'amidon ou plus généralement de glucides complexes.

ADDITIF Composé naturel ou chimique incorporé à un aliment pour faciliter sa conservation, modifier sa couleur, etc. Il est identifié par un code à trois chiffres précédé de la lettre E.

(soit 375 à 500 g par jour) réduirait déjà de 22 % le risque de décès prématuré, à sept ans (3).

...mais éviter celle qui est ensachée

La présence de résidus de chlore, utilisé pour laver la salade et la débarrasser de germes potentiels, a été mise en évidence il y a six ans dans 24 des 28 salades en sachet testées par le magazine *Que choisir* (4). Par ailleurs, une étude en laboratoire a montré que lorsqu'une salade en sachet est contaminée par la salmonelle, bactérie à l'origine d'intoxications alimentaires, la concentration de celle-ci augmente dans le jus libéré par les feuilles. En outre, laver les feuilles contaminées ne serait pas suffisant pour éliminer les bactéries (5). Mieux vaut donc choisir une salade fraîche du marché.

Des protéines et des glucides pour la satiété

Des protéines animales et rassasiantes peuvent être apportées par des œufs, des crustacés, de la viande maigre (dés de jambon, blanc de poulet, etc.). Pour une assiette végétalienne (sans sources animales), cet apport protéique peut être fourni par les légumineuses (lentilles, haricots, pois chiches…) associées à des céréales (riz, pâtes…), de préférence complètes. Céréales et légumineuses contribuent également à l'effet de satiété grâce à leur apport en glucides complexes et en fibres (13,8 g/100 g de haricots blancs). Consommer au moins 25 à 29 g de fibres par jour réduit de 16 à 24 % le risque de maladie coronarienne, d'accident vasculaire cérébral, de diabète de type 2 et de cancer colorectal (6).

Certaines salades industrielles ne sont pas assez équilibrées

Prudence pour celles et ceux qui surveillent leur poids car certains aliments peuvent peser lourd sur la balance, tels les lardons (324 kcal/100 g) ou le magret de canard (222 kcal/100 g) d'une salade landaise, les croûtons (492 kcal/100 g) d'une salade césar ou le saumon fumé (178 kcal/100 g) d'une norvégienne.

Veillez aussi à la composition des salades industrielles : certaines sont très riches en féculents (pâtes, riz) mais ne sont pas assez pourvues en protéines ou en légumes pour composer un déjeuner complet. Par exemple, la salade thaïe de Monoprix n'affiche que 12,2 g de protéines pour 380 g. Par ailleurs, autant éviter les salades industrielles contenant des additifs — épaississants pour la sauce (gomme xanthane), agents de goût (acide citrique, amidon modifié, sel) et conservateurs (sorbate de potassium).

Un assaisonnement sur mesure

Plutôt que la mayonnaise, qui surcharge la facture calorique comme les sauces industrielles riches en sucre, on préférera une cuillère à soupe de vinaigrette à base d'huile de colza ou de noix, pour leur apport en oméga-3. On peut aussi pimenter l'assaisonnement d'épices (curcuma, gingembre…), de condiments (ail, oignon, échalotes) et d'herbes aromatiques (menthe, ciboulette, persil…), sources de minéraux, de vitamines et d'antioxydants. Saupoudrer chaque jour ses aliments d'une cuillère à café bombée (6,6 g) d'un mélange d'herbes et d'épices (basilic, thym, coriandre, cannelle, curcuma…) diminuerait la tension artérielle chez des personnes à risque cardio-vasculaire (7). ■

Sylvie Boistard
@syboistard

SIBYLLE NAUD, diététicienne-nutritionniste, à Paris

La recette pour un repas complet

« Parfois, la proportion d'aliments dans les salades industrielles n'est pas adéquate et favorise les petits creux en milieu d'après-midi. Pour qu'une salade composée puisse constituer un véritable repas complet, il faut compter 350 à 450 g par personne, avec une base de 150 g (6 cuillères à soupe) à 250 g de légumineuses ou de céréales complètes cuites, de 100 g de légumes et de 100 g de viande, œuf ou poisson, complétés d'une à deux cuillères à soupe de vinaigrette. »

(1) Nielsen, tous circuits, 2020.

(2) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(3) Fruit, vegetable, and legume intake, and cardiovascular disease and deaths in 18 countries (PURE): a prospective cohort study, Miller V. et al, *The Lancet*, 2017.

(4) Comparatif Salades en sachet, *Que choisir*, 2016.

(5) Salad Leaf Juices Enhance Salmonella Growth, Colonization of Fresh Produce, and Virulence, Koukkidis G. et al, *Applied and Environmental Microbiology,* 2016.

(6) Carbohydrate quality and human health: a series of systematic reviews and meta-analyses, Reynolds A. et al, *The Lancet*, 2019.

(7) Herbs and spices at a relatively high culinary dosage improves 24-hour ambulatory blood pressure in adults at risk of cardiometabolic diseases: a randomized, crossover, controlled-feeding study, Petersen KS. et al, *American Journal of Clinical Nutrition*, 2021.

Khashabiyeh

Un sanctuaire inédit au cœur du désert

De gigantesques pièges baptisés « cerfs-volants du désert » ont été découverts en Jordanie. Jusque-là méconnues dans cette région du Proche-Orient, ces structures liées à des chasses de masse dévoilent une installation rituelle sans précédent.

Par Bernadette Arnaud @NarudaaArnaud

À première vue, il ne s'agit que d'une vaste étendue de sable et de cailloux, bordée par un escarpement d'une cinquantaine de mètres de hauteur : Khashabiyeh, ou précisément Jibal al-Khashabiyeh, est situé dans une immense dépression, un paléolac au sol craquelé et brûlé, localisé à plus de 300 km à vol d'oiseau au sud-est d'Amman, la capitale du royaume hachémite. C'est pourtant là, sur ce plateau désertique ou hamada, que les Bédouins nomment d'un enchanteur Ardh as-Suwan (la « terre du silex »), qu'une équipe de chercheurs franco-jordaniens — la Mission archéologique du sud-est jordanien — a découvert des

BRUNO BOURGEOIS

desert kites, ou « cerfs-volants du désert ». C'est-à-dire d'imposants alignements de pierres, plus visibles du ciel que du sol, identifiés au début du XXe siècle lors du survol des steppes basaltiques de la Syrie et de l'Arabie saoudite, mais qui n'avaient jamais été repérés dans l'univers calcaire de la plaine jordanienne *(lire l'encadré p. 78)*. Des mégastructures constituées de longs murets convergeant vers un enclos ponctué d'éléments circulaires, s'étendant sur plusieurs kilomètres, et dont le nom fut attribué en raison de leur ressemblance, vues du ciel, avec des cerfs-volants. Nommés localement *masayed hajariyyah*, ces murets assez peu élevés (de 30 à 40 cm) composaient des pièges empierrés liés à des chasses de masse,

MISSION ARCHÉOLOGIQUE DU SUD-EST JORDANIEN.

Vieille de 9000 ans, cette stèle gravée représentant un visage humain fait partie d'une installation rituelle découverte sur le site JKSH P52 de Jibal al-Khashabiyeh, à proximité des pièges à gazelles et de campements d'habitations circulaires.

CERFS-VOLANTS

De l'Arabie au Kazakhstan

Les « cerfs-volants du désert » sont des structures spectaculaires disséminées dans les paysages arides du Moyen-Orient et du sud-ouest de l'Asie. Quasi invisibles au sol, c'est avec le développement de l'aviation que ces prodigieux alignements de pierres de plusieurs kilomètres de long ont attiré l'attention d'archéologues pilotes tels que le père Antoine Poidebard (1878-1955) au début du XXe siècle. Ils s'étendent du centre de l'Arabie saoudite jusqu'au Kazakhstan, en passant par la Jordanie, la Syrie, la Turquie et l'Arménie.

YANN ARTHUS-BERTRAND

Les prises de vues aériennes ont permis la découverte de nombre de pièges nommés « cerfs-volants » (ici en Jordanie).

que des découvertes viennent pour la première fois d'associer, dans tout le Proche-Orient, à des populations de chasseurs préhistoriques.

Chercheur à l'Institut français du Proche-Orient (Ifpo), rattaché au laboratoire Archéorient (CNRS-université Lumière Lyon 2), Wael Abu-Azizeh codirige la Mission archéologique du sud-est jordanien avec son collègue Mohammad Tarawneh de l'université al Hussein Bin Talal de Jordanie, avec qui il arpente depuis une quinzaine d'années les régions les plus reculées du désert jordanien. À plus d'un titre, le jeune chercheur est en effet convaincu que ces mornes immensités, qui représentent jusqu'à 70 % des terres du Proche-Orient, n'ont pas été abandonnées par les humains au néolithique, il y a 12 000 ans, comme le clame la littérature scientifique. Pour lui, le Croissant fertile, cet espace s'étirant de la mer Morte au golfe Persique, présenté depuis le début du XXe siècle comme le noyau de la « révolution néolithique », soit le berceau de l'agriculture, de l'élevage, de la sédentarisation ou de l'apparition des premières occupations villageoises, n'a pas été l'unique modèle *(lire l'encadré p. 80)*. Et pour en fournir les preuves, chaque fois qu'il en a l'occasion, il se rend dans les zones inhabitées du sud-est de la Jordanie, pour parcourir ces territoires et effectuer de longues explorations de reconnaissance à la recherche de sites. C'est au cours d'un de ces repérages, en 2013, alors qu'il sillonne le secteur de Khashabiyeh après avoir quitté la petite agglomération d'Al-Jafr et emprunté une piste poussiéreuse pendant 80 km, que son regard est attiré par un étrange amas de pierres en surface. Des blocs épars dont, « *par acquit de conscience* », il enregistre la position GPS (coordonnées de latitude et de longitude). « *Le désert est en effet rempli de formes singulières qu'il vaut mieux toujours situer géographiquement quand on les croise* », explique-t-il.

W. ABU AZIZEH

« Le désert est rempli de formes singulières qu'il vaut mieux toujours situer géographiquement quand on les croise »

Wael Abu-Azizeh, codirecteur de la Mission archéologique du sud-est jordanien

Les plus anciennes mégastructures humaines

De retour à Amman, une fois les données intégrées dans son ordinateur, un passage sur Google Earth et l'étude d'images satellites à haute résolution lui font constater que les restes décelés au milieu de cette plaine caillouteuse sont liés à des alignements de cerfs-volants. Un réseau considérable de huit mégastructures formant une chaîne de 17 km de long du nord au sud. « *Si je n'avais pas pris ce point GPS, je n'aurais jamais pu voir qu'il s'agissait de cerfs-volants sur les images satellitaires et nous serions passés à côté d'une découverte majeure !* » s'enthousiasme-t-il. Ce que vont confirmer trois campagnes de terrain menées entre 2013 et 2021. Réalisés dans des conditions logistiques complexes — tout doit être apporté depuis les villes les plus proches (Wadi Mousa et Ma'an), de l'eau potable au carburant —, ces

MISSION ARCHÉOLOGIQUE DU SUD-EST JORDANIEN

◀ ▲ **Des fossiles marins** parfaitement ordonnés ont été mis au jour à l'arrière des stèles du site de Jibal al-Khashabiyeh (ci-dessus) ainsi que des figurines (ci-contre la tête de l'une d'entre elles).

travaux vont révéler une implantation de groupes humains pratiquant des chasses massives au moyen de ces pièges géants, à une époque bien antérieure à celle estimée jusque-là. La plupart des études menées tendaient en effet à attribuer l'existence de ces arrangements de pierres aux IVe-IIIe millénaires avant J.-C., soit à l'âge du bronze ancien. Or, au fur et à mesure de l'avancée des fouilles, des charbons de bois intacts retrouvés en stratigraphie dans les niveaux archéologiques ont permis de procéder à des analyses radiocarbone. Les résultats ont été sans appel : l'occupation de ces sites remonte à 7000 ans avant J.-C. Ce qui fait reculer de plusieurs millénaires la véritable origine de ces interminables tracés de pierre. Une période que les historiens du Proche-Orient désignent sous le nom de PPNB (période précéramique B, pour l'anglais *Pre-Pottery Neolithic B*). *« Avec ces 9000 ans, les "cerfs-volants du désert" de Khashabiyeh sont désormais considérés comme les plus anciennes structures à grande échelle construites par l'homme »*, affirme Frédéric Abbès, directeur du laboratoire Archéorient (CNRS-université Lumière Lyon 2).

Ces résultats, aux implications inestimables pour la connaissance des développements humains au Proche-Orient, ont laissé les spécialistes rêveurs. Tout d'abord, en décelant des quantités hors norme de carcasses de gazelles à goitre *(Gazella subgutturosa)* à proximité des *kites* — jusqu'à plus de 10 000 restes fauniques —, les chercheurs ont compris qu'ils étaient face à un site de chasse de masse insoupçonné dans un contexte aussi précoce. La preuve, selon eux, qu'une spécialisation de chasse existait il y a déjà 9000 ans à l'orée du Croissant fertile, peut-être même avant le développement du pastoralisme nomade. D'autre part, *« ces stratégies de chasse nécessitaient une grande organisation et la collaboration de populations tant pour construire ces structures que pour y rabattre les gazelles sauvages ainsi prises au piège et traiter les produits de ces chasses »*, indique Wael Abu-Azizeh. Pour le chercheur, l'exploitation de ces ressources animales et la quantité d'ossements retrouvés témoignent surtout de comportements allant au-delà d'une simple consommation domestique. *« À l'époque, le produit de ces chasses s'inscrivait dans une économie de production et d'échanges avec d'autres populations »*, précise-t-il.

Mais l'apogée de ces découvertes est atteint en 2021. Parmi les trois sites d'habitations circulaires semi-enterrées attenant aux cerfs-volants dégagés lors des campagnes de fouilles — en particulier « JKSH 19 » et « JKSH P52 » —, d'innombrables objets ont surgi des profondeurs du sol. Au nombre des plus spectaculaires figurent deux stèles anthropomorphes (épousant une forme humaine) dressées et gravées de visages, dont une haute de 1,12 mètre et une seconde de 70 cm. Le plan du piège voisin, finement sculpté, est même observable sur l'une d'elles. *« Avec ses 9000 ans, il pourrait d'ailleurs s'agir du plus vieux plan de l'humanité ! »* déclare Wael Abu-Azizeh, qui prépare une publication scientifique sur ce sujet. Et les surprises ne se sont pas arrêtées là. À l'arrière des stèles, un ▶

MISSION ARCHÉOLOGIQUE DU SUD-EST JORDANIEN

Les milliers d'ossements de gazelles mis au jour à Khashabiyeh attestent d'une pratique de chasse de masse, dont le produit servait à des échanges avec d'autres populations.

dépôt ordonné de 150 fossiles marins a été déterré, au grand étonnement des archéologues. *« Par leur agencement, la disposition des bulbes des ammonites et des nautiles fichés dans le sol faisaient immanquablement penser à une assemblée de petits personnages »*, avance Wael Abu Azizeh. Une utilisation de fossiles en contexte rituel totalement inconnue au Proche-Orient. Sous ce dépôt, ont également été extraites trois pointes de flèche en quartzite rouge, aux extrémités volontairement brisées. Alentour, des phallus en pierre et quatre figurines animales ont suivi, en même temps que des blocs de silex. Des éléments de parure en pierre et en nacre, des fragments de bracelets en grès rouge et quelques perles taillées indiquent en outre des preuves d'échanges avec des populations sédentaires vivant dans les secteurs plus humides des hautes terres occidentales de Jordanie, tel le site néolithique de Ba'ja, près de la célèbre cité nabatéenne de Pétra (VI[e] siècle avant J.-C.), où des spécimens identiques sont connus. En poursuivant les fouilles, une pierre d'autel est aussi apparue. *« Ce bloc équarri entièrement émoussé, sans la moindre arête saillante, indique une longue utilisation. Sans doute a-t-il servi à des pratiques sacrificielles »*, glisse Wael Abu-Azizeh, ajoutant : *« La récurrence de la référence aux* kites *retrouvés sur les stèles gravées, associée au dépôt de fossiles, à la pierre d'autel, et au modèle réduit de* kite *reproduit au sol à la façon d'une maquette, nous introduit clairement concernant ce site dans la sphère symbolique et spirituelle. »* Quelques mortiers présents, ayant pu servir à moudre des plantes sauvages sans jamais être attachés au moindre instrument agricole, ont également été dégagés.

D'autres modes de vie ont existé en marge du Croissant fertile

« Pendant très longtemps, une idée préconçue a voulu qu'il n'y ait rien à trouver dans ces espaces désertiques. Mais nous avons la preuve aujourd'hui que d'autres modes de vie, qui n'avaient pas encore été repérés par les archéologues au néolithique, ont bel et bien existé en dehors du Croissant fertile », insiste Wael Abu-Azizeh. L'impressionnant site de Khashabiyeh était sans doute voué à honorer ces chasses, en sollicitant des forces surnaturelles pour attraper un abondant gibier, à destination desquels de potentiels sacrifices ont été exécutés. *« Cette installation est non seulement unique en raison de son état de conservation exceptionnel, mais aussi parce qu'elle permet de jeter un nouvel éclairage sur le symbolisme, l'expression artistique ainsi que la culture spirituelle des populations néolithiques spécialisées dans la chasse de masse à l'aide des cerfs-volants du désert »*, déclare Wael Abou-Azizeh.

« Ces trouvailles confortent surtout l'idée que Khashabiyeh n'est pas un site appartenant au modèle néolithique des premières populations agricoles, même s'il en est contemporain. Nous sommes face à des formes alternatives de néolithisation jusque-là ignorées, qui se sont développées en marge du Croissant fertile », souligne de son côté Frédéric Abbès. En archéologie, il faut souvent des annonces spectaculaires pour attirer l'attention et faire resurgir des problématiques qui ont été mises de côté : *« Ce site nous oblige à penser autrement, et ces découvertes ont ouvert de nouveaux champs de recherche ! »* ■

ÉVOLUTION

La révolution du néolithique

Cette période est désignée comme le moment où les humains ont inventé l'agriculture et la sédentarisation, il y a environ 12 000 ans. Quand les chasseurs-cueilleurs, au mode de vie nomade, sont passés d'une alimentation plus aléatoire à sa production contrôlée, grâce à la domestication des plantes et celle des animaux. Ce moment de rupture fondamentale dans l'histoire de l'humanité est comparé à celui de la révolution industrielle. En entraînant une explosion démographique et une course au progrès grâce à l'accélération des inventions — charrue, roue, traction animale, outils en métal, etc. —, cette « révolution » s'est trouvée également associée, selon certains spécialistes tel l'archéologue Jean-Paul Demoule, à l'origine des inégalités sociales et de l'émergence des chefs.

Un drone sous-marin a permis d'obtenir ces images qui mettent en évidence la structure intacte du navire. Son nom est bien lisible sur la poupe.

FALKLANDS MARITIME HERITAGE TRUST AND NATIONAL GEOGRAPHIC

L'« Endurance » enfin retrouvé cent ans après son naufrage

L'épave du trois-mâts de l'explorateur britannique Ernest Shackleton, brisé par les glaces en 1915 en Antarctique, vient d'être découverte par 3000 mètres de fond dans la mer de Weddell dans un état de conservation exceptionnel.

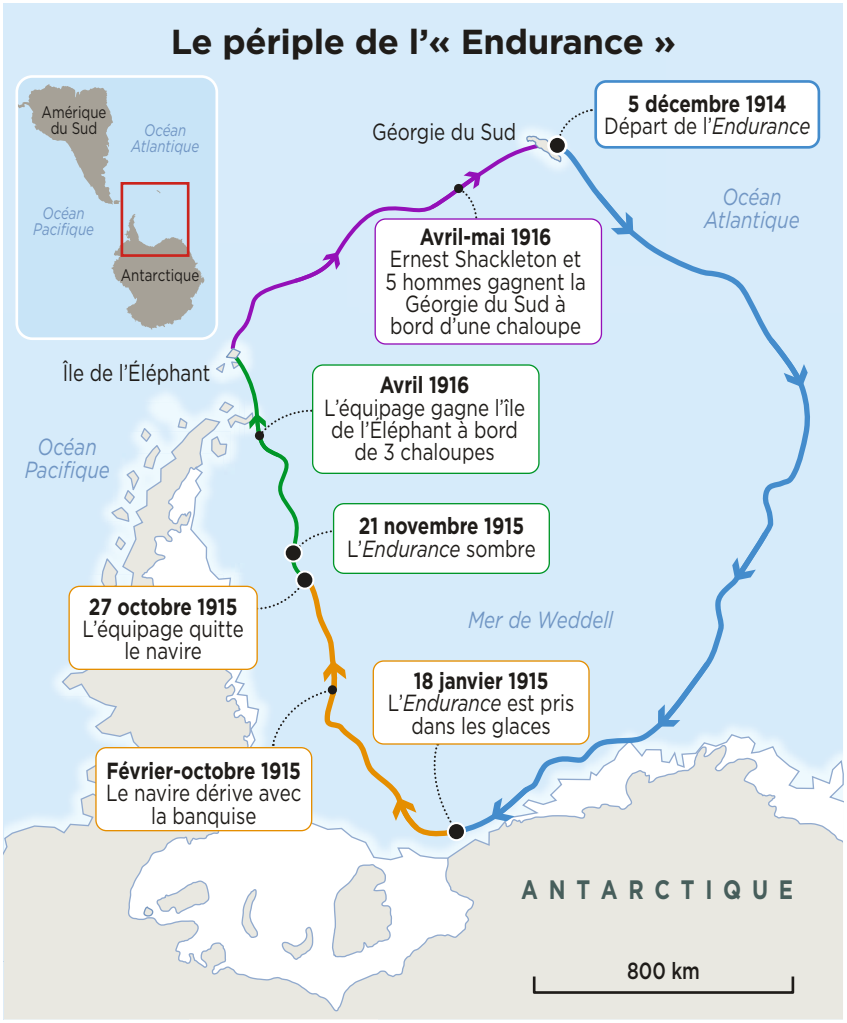
Elle était considérée comme l'épave la plus inaccessible du monde, mais un peu plus de cent ans après son naufrage, l'*Endurance* est apparu devant les yeux ébahis d'une équipe de 64 archéologues marins, ingénieurs, techniciens et scientifiques partis à sa recherche dans la mer de Weddell, au large de l'Antarctique. « *C'est de loin la plus belle épave de bois que j'ai vue. Elle se tient droite, très fière sur le fond marin, intacte, dans un fantastique état de préservation,* s'est ému Mensun Bound, le directeur de l'expédition Endurance22, commentant les images rapportées par un drone sous-marin. *On peut même lire son nom inscrit en arc de cercle sur la poupe !* » À croire que pour qu'elle se laisse enfin prendre, l'épave de l'*Endurance*, navire de l'explorateur britannique Ernest Shackleton brisé par les glaces en 1915, exigeait qu'on la mérite. Il aura en effet fallu deux expéditions de plus d'un mois — la première organisée en 2019, la seconde en février dernier — et beaucoup d'ingéniosité pour enfin la locali-

ser, à six kilomètres au sud de sa position initialement enregistrée par le capitaine Frank Worsley au moment du naufrage. Seule dans le silence des eaux polaires, à 3008 mètres de profondeur, elle aura peut-être attendu que l'on commémore, le 5 janvier, le centenaire de la mort de l'explorateur britannique…

L'expédition Endurance22 avait quitté Le Cap (Afrique du Sud) le 5 février à bord d'un des navires de recherche polaire les plus grands et les plus modernes au monde, le brise-glace sud-africain *SA Agulhas II*. « *Nos objectifs étaient de localiser, d'étudier et de filmer l'épave, mais aussi de mener d'importantes recherches scientifiques et d'organiser un programme de sensibilisation exceptionnel* », a rappelé Donald Lamont, le président du Falklands Maritime Heritage Trust, organisateur de la mission dont le coût a dépassé les 10 millions de dollars, offerts par un donateur anonyme.

Une expédition de recherche aux multiples records

Il faut dire que les moyens devaient être à la hauteur de la complexité de la tâche : « *Il s'agit de l'un des projets sous-marins les plus difficiles jamais entrepris, au cours duquel plusieurs records mondiaux ont été atteints pour assurer la détection de l'épave* », assure Nicolas Vincent, ingénieur pour le compte de Deep Ocean Search (société spécialisée dans la recherche en eau profonde) et chef d'orchestre des opérations sous-marines qui ont permis de retrouver le navire de légende. Jamais un drone sous-marin ne s'était par exemple aventuré si profondément dans ces eaux, ou n'avait encore couvert une si grande surface de recherches. « *Notre submersible a balayé le fond de la mer de Weddell sur 300 km², soit presque la surface de la ville du Cap* », détaille Nicolas Vincent. Une recherche menée sous une contrainte énorme : la dérivation des glaces. « *Le bateau ne cessait de dériver au gré des glaces, rendant les recherches sur un point fixe extrêmement compliquées. En réalité, tout est compliqué dans un environnement pareil.* » Si même au XXIe siècle les experts en recherches sous-marines les plus renommés au monde ressentent cette hostilité, il n'est pas étonnant que le périple de l'équipage de l'*Endurance* soit devenu l'un des récits de survie les plus mythiques de l'histoire.



L'épopée de ce solide trois-mâts commence le 6 août 1914, lorsqu'il quitte le port de Plymouth, en Angleterre, et met les voiles vers Buenos Aires, en Argentine. Après un court séjour dans la métropole sud-américaine, il doit faire une dernière escale dans la station baleinière de Grytviken, sur l'île de Géorgie du Sud, avant d'entamer véritablement l'expédition que ses 28 membres d'équipage sont venus mener : la première traversée à pied du continent antarctique, de la mer de Weddell à la mer de Ross, *via* le Pôle. À la tête de cette aventure, outre Ernest Shackelton, physicien habitué des régions polaires, participent un géologue et un biologiste. Au cours des derniers jours de janvier 1915, alors qu'elle n'est plus qu'à une journée de voyage de sa destination finale, l'*Endurance* se retrouve bloqué par d'importants blocs de glace. Malgré les efforts des marins pour tenter d'ouvrir un chenal, et bien que le trois-mâts de 44 mètres ait été construit pour résister aux mers polaires encombrées de glace, il demeure enserré

FRANK HURLEY / SCIENCE SOURCE / AKG-IMAGES

L'équipage de l'« Endurance » tentera en vain à plusieurs reprises de libérer le trois-mâts prisonnier de la glace, en 1915.

ESTHER HORVATH AND FALKLANDS MARITIME HERITAGE TRUST

Embarqués à bord du navire de recherche polaire « Agulhas II », les chercheurs sont parvenus à localiser l'épave, en février.

dans un étau gelé. L'équipage, trop éloigné pour appeler à l'aide, décide d'attendre la fin de l'hiver en espérant que la fonte des glaces libère le bateau. Mais celui-ci dérive durant des mois avec la banquise, dont il est toujours prisonnier.

Tous les membres de l'« Endurance » ont été sauvés

Près d'un an s'écoule. Une période durant laquelle ses passagers sont contraints de survivre à bord avec une réserve de vivres très limitée. Mais le 27 octobre 1915, des craquements plus bruyants qu'à l'ordinaire se font entendre. La coque ne supporte plus la pression de la glace et commence à céder. L'équipage est contraint de camper sur la banquise. Le 21 novembre 1915, l'*Endurance*, broyé, finit par sombrer. Les mois passent et se ressemblent. En avril 1916, le dégel oblige l'équipe à embarquer dans les trois canots de sauvetage récupérés lors du naufrage jusqu'à l'île de l'Éléphant, qui n'est rien d'autre qu'un amas de montagnes rocheuses au nord de la péninsule Antarctique. Depuis ce décor plus austère encore que la banquise, Ernest Shackleton décide d'aller chercher de l'aide en Géorgie du Sud. Il embarque avec cinq de ses compagnons dans une simple chaloupe, une baleinière baptisée *James-Caird*, que le charpentier de l'expédition a renforcée tant bien que mal pour résister à une traversée de la dernière chance. L'explorateur britannique laisse derrière lui ses 22 camarades, à qui il promet l'impossible… ou presque.

En seize jours, le petit groupe parcourt 1300 kilomètres à travers les mers les plus hostiles du globe et finit par atteindre la côte méridionale de l'île de Géorgie du Sud, malgré l'épuisement, la soif et la faim. Le périple n'est pourtant pas terminé : il faut encore rejoindre la côte peuplée de l'île, et plus exactement la petite station baleinière de Stromness, à environ 36 heures de marche. Là encore, Ernest Shackelton et deux de ses hommes réussissent l'exploit de traverser à pied un paysage hostile où soufflent des vents épouvantables. Depuis Stromness, une mission de sauvetage est enfin lancée, que l'explorateur dirige une nouvelle fois. Le 30 août 1916, elle ramène sains et saufs tous les membres de l'expédition. Un véritable exploit.

Une épave préservée des dégradations des xylophages

D'endurance, Ernest Shackelton en aura assurément fait preuve. Mais à juger par son état actuel, le navire de l'expédition portait également bien son nom. *« Des épaves en bois, j'en ai retrouvé et exploré des centaines. Souvent, le grand public imagine qu'elles gisent au fond des mers comme la* Licorne *dans Tintin, alors que la plupart du temps, il ne reste presque plus rien d'elles. Avec l'*Endurance, *on a bien cette impression qu'elle a sombré hier. C'est encore mieux que dans Tintin !* », s'exclame Nicolas Vincent. Malgré son extraordinaire état de conservation, que l'on doit en partie à l'absence d'organismes xylophages, l'épave ne sera pas touchée : en vertu du traité sur l'Antarctique, elle est considérée comme un « monument historique ». *« J'espère toutefois que d'autres après nous reviendront la voir* », avance l'ingénieur. *« Nous avons encore beaucoup à apprendre d'elle.* » ■

Marine Benoit @marin_eben

THIERRY GRUN / AFP

Avant d'investir dans un équipement photovoltaïque, il est préférable de prendre conseil auprès d'experts indépendants.

Tri, énergies vertes
Cinq questions pour s'améliorer

Plus que jamais, la flambée des prix du gaz et du pétrole pousse les particuliers à devenir proactifs : mieux trier, moins gaspiller et se chauffer différemment est possible.

Par Maguelone Bonnaud, avec Agence Forum News

1 Comment produire moins de déchets ?

« Il n'y a pas de meilleur déchet que celui que l'on ne produit pas », répètent les spécialistes. Pourtant, chaque année, un ménage génère quelque 570 kg de déchets. Soit deux fois plus qu'il y a quarante ans. Premier levier pour éviter de jeter : acheter moins. Le vrac est une option. *« Cela permet à la fois de réduire de 72 % le poids des emballages et le gaspillage alimentaire »*, argue Didier Onraita, le fondateur de la chaîne de magasins 100 % vrac Day by day. En 2030, les supermarchés de plus de 400 m² devront consacrer 20 % de leur surface de vente au vrac. Acheter mieux, c'est aussi acheter durable : consulter les labels environnementaux sélectionnés par l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie)*, tenir compte de « l'indice de durabilité » imposé depuis un an pour les lave-linge, smartphones, ordinateurs portables… Autre levier : acheter d'occasion. Choisir des produits reconditionnés et fréquenter les recycleries, ressourceries… *« Quand on veut protéger la planète, le mot d'ordre doit être : longue vie aux objets »*, résume Florence Clément, de l'Ademe.

* sciav.fr/903labels

2 Cela sert-il à quelque chose de trier le plastique ?

Plus la recherche avance, plus l'impact du plastique — à base de pétrole — se confirme. Aux spectaculaires vortex de déchets du Pacifique, s'ajoutent les nuisances invisibles des nanoparticules qui affectent déjà les cours d'eau*. Pourtant, le recyclage du plastique est encore limité. Quand l'acier est recyclé à 100 % et le verre à 85 %, le taux de recyclage du plastique tombe à 28 % selon Citeo, éco-organisme consacré aux emballages ménagers. Neuf emballages plastiques sur dix sont fabriqués à partir de cinq résines (PET, PP, PEHD, PEBD et PS), complexes et coûteuses à dissocier à l'échelle industrielle. Alors pourquoi inciter les particuliers à trier des pots de yaourt s'ils finissent à 97 % dans un incinérateur ? *« Des collectes massives sont nécessaires pour développer les filières spécialisées »*, insiste Stéphanie Foucard, directrice de la mobilisation chez Citeo. *« Arrêter de trier serait une catastrophe,* renchérit Lise Nicolas, cofondatrice de M^r et M^me Recyclage, bureau d'études spécialisé. *Cela permet à des milliers de tonnes de matière première de ne pas être puisées. Or c'est l'étape de production qui est la plus impactante pour l'environnement. »*

* sciav.fr/903plastic

3 Le compostage est-il vertueux pour l'environnement ?

Plus du tiers de nos poubelles d'ordures ménagères est composé de déchets organiques (épluchures, restes de repas, gazon…). *« Ces déchets putrescibles sont pourtant les plus faciles à valoriser, par le compostage ou la méthanisation* [production de gaz par fermentation], *pour devenir un fertilisant ou un gaz de chauffage,* atteste Isabelle Gaton, spécialiste

▶ **89 % des Français trient les emballages dont 51 % systématiquement.**

▶ **3,7 millions de tonnes d'emballages ménagers recyclées en 2020, soit 1,6 million de tonnes de CO_2 évitées, ce qui équivaut à 800 000 voitures en moins sur les routes.**

L'énergie est notre avenir, économisons-la!

(1)Le calcul des économies est réalisé à partir de données de production issues du site PVGis (prenant en compte l'inclinaison et l'orientation du toit), de données de consommation estimées grâce à la date de construction du logement et le nombre d'occupants (références obtenues avec le rapport RAGE 2014, ADEME) et d'un taux d'autoconsommation fixé à 75%. Le montant en euros est calculé en multipliant les kWh autoconsommés (production solaire multipliée par le taux d'autoconsommation) avec un prix du kWh fixé à 0,2087€ pour les 10 prochaines années. Ce prix est défini sur la base du tarif réglementé Heures Pleines 9kVA applicable au 1er août 2021 sur lequel est appliquée une augmentation de 3% par an sur les 10 prochaines années. Informations données à titre indicatif, qui ne tiennent pas compte des habitudes de consommation, du contrat d'énergie souscrit et de l'éventuelle revente sur le réseau. Exemple pour 1000€ d'économies/an : maison située à Nice (06), orientée plein sud, inclinaison du toit 35° par rapport à l'horizontale, logement construit avant 1980, surface de 130m², chauffage et eau chaude sanitaire fonctionnant à l'électricité, avec climatisation et piscine, composé de 4 personnes, et puissance installée de 4,5kWc. Ce montant n'inclut pas la revente du surplus sur le réseau électrique, ni les aides de l'État.

ENGIE My Power, société par actions simplifiée au capital de 9846000€, dont le siège social est situé 1 place Samuel de Champlain 92400 Courbevoie, immatriculé au registre du commerce et des sociétés de Nanterre sous le n° 849069554. © Getty Images.

du compostage à Est Ensemble (neuf communes de Seine-Saint-Denis). *Il est aberrant d'incinérer des épluchures composées à 80 % d'eau !* » Ou de générer du gaz à effet de serre en enfouissant ces matières fermentescibles… « *La valorisation organique pourrait concerner 38 % des ordures ménagères résiduelles, soit plus de 6 millions de tonnes (100 kg par habitant et par an)* », évalue la dernière étude Modecom de l'Ademe. D'ici à fin 2023, chaque foyer devra disposer d'une solution pour trier les biodéchets à la source. Une centaine de collectivités ont instauré une collecte séparée de biodéchets en porte à porte. « *Et les composteurs de proximité se multiplient* », précise Isabelle Gaton.

4 À quelles énergies renouvelables recourir chez soi ?

Tant pour limiter les gaz à effet de serre que pour réduire notre dépendance énergétique, en particulier auprès de la Russie, il est urgent de se tourner vers des énergies vertes.
Lorsqu'un logement est équipé de chauffage central, l'Ademe oriente vers les pompes à chaleur, qui captent les calories de l'air pour chauffer les radiateurs. Une alternative écologique aux deux énergies fossiles que sont le gaz et le fioul. D'autant que les installations au fioul seront interdites en juin. Le recours à la biomasse, avec un poêle à bois, est également une alternative. Par ailleurs, « *pour diminuer sa facture électrique, les panneaux photovoltaïques sont intéressants pour tout foyer qui a une consommation électrique supérieure à 4000 kilowattheures par an* », affirme Raphaël Peixoto, responsable du solaire chez le comparateur d'énergies Hello Watt.

5 Comment bien les choisir ?

Pour installer des panneaux solaires ou une pompe à chaleur, recourir à des entreprises assorties du label RGE (reconnu garant de l'environnement) est une précaution nécessaire mais insuffisante. Il est recommandé de se faire accompagner par des experts indépendants. Le réseau France Rénov', service public de la rénovation de l'habitat, dispose de 450 agences locales pour conseiller les particuliers : choix des travaux, conseils en fournisseurs, listes d'artisans, aides financières… Un numéro unique a été mis en place en janvier*. Des comparateurs d'énergie, comme Hello Watt ou Selectra, permettent également de s'orienter. Concernant le photovoltaïque, l'association GPPEP *(lire l'entretien ci-dessus)* est de bon conseil. Pour s'assurer qu'un fournisseur d'électricité vend une énergie réellement « verte », on peut se fier au label Vert Volt, lancé en octobre 2021 par l'Ademe, qui inventorie les entreprises vertueuses. Ou à celui de Greenpeace, qui pointe du doigt les fournisseurs investissant dans les énergies fossiles. ■

* 0. 808.800.700.

JOËL MERCY, PRÉSIDENT DU GPPEP *

« Le photovoltaïque permet de réduire sa facture »

DR

Quelle est la légitimité du Groupement des particuliers producteurs d'électricité photovoltaïque que vous présidez ?
Créée en 2009, notre association d'intérêt général compte aujourd'hui 12 000 adhérents. Elle fait partie des organismes qui délivrent les qualifications RGE, comme Qualibat, Qualifelec, Qualit'EnR ou encore AQPV, et est membre de plusieurs instances de grands fournisseurs comme EDF ou Enedis. Nous aidons 4000 foyers par an à s'équiper et conseillons des collectivités locales. Nous travaillons à promouvoir les énergies renouvelables dans le cadre d'une transition énergétique en douceur.

Pourquoi conseillez-vous aux particuliers de s'équiper en panneaux solaires ?
L'autoconsommation photovoltaïque est aujourd'hui un bon moyen de réduire sa facture d'électricité. Des panneaux installés sur un toit ensoleillé n'occasionnent aucune pollution, ni visuelle ni sonore, et ils sont recyclables à 95 %. Une installation basique de 3 kilowatts-crête occupe 15 à 18 m² et permet d'économiser environ 500 euros par an. Si l'on compte un investissement de 6500 euros, il est donc amorti en douze ans. Or les panneaux sont garantis vingt-cinq ans et, au-delà de trente-cinq ans, ils produisent encore 80 % de leur capacité.

Le photovoltaïque peut-il couvrir 100 % de notre consommation électrique ?
Non, car les panneaux ne fournissent de l'énergie en quantité que lorsqu'il fait très beau. En hiver, avec une installation de 3 kilowatts-crête, vous n'obtenez que de quoi faire tourner un four pendant une heure. Et le stockage est pour l'heure hors de portée, car très cher. ■ **Propos recueillis par M. B.**

* Groupement des particuliers producteurs d'électricité photovoltaïque.

72H POUR DÉCOUVRIR ET PRÉSERVER LES TRÉSORS DE NOTRE PLANÈTE BLEUE

GRAND OCEAN

DU 7 AU 9 OCT. 2022

À LA CITÉ DE LA MER, CHERBOURG-EN-COTENTIN
À SAINT-VAAST-LA-HOUGUE

& EN DIGITAL

www.grandocean-event.com

Partenaires Officiels

CHERBOURG en Cotentin

leCotentin COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION

NAVAL GROUP

Partenaires Associés

LA MANCHE LE DÉPARTEMENT

RÉGION NORMANDIE

Partenaire

SFA Agitateur d'eau

Organisé par

Les Echos Le Parisien ÉVÉNEMENTS

SCIENCES AVENIR La Recherche

TRANSVERSALES

SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 88

▶ C'est à voir
p. 92

▶ Le ciel du mois
p. 93

▶ Chroniques
p. 94

▶ Questions de lecteurs
p. 96

▶ Solutions des jeux
p. 97

▶ Jeux
p. 98

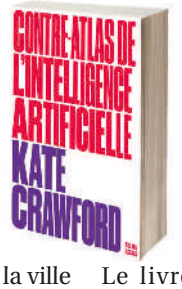
SPENCER LOWELL/TRUNK ARCHIVE

Industrie vorace en ressources naturelles, matérielles et humaines (ici un entrepôt Amazon aux États-Unis), l'IA, selon l'auteure, a un impact réel sur l'environnement et les rapports sociaux.

La part noire de l'intelligence artificielle

Chercheuse australienne spécialisée dans les implications sociales et politiques des technologies numériques, l'auteure dresse un inventaire de ce qu'est vraiment l'IA.

DÉMYTHIFICATION Ruée vers l'or en Californie (États-Unis) en 1849 et vers l'intelligence artificielle (IA) dans le monde aujourd'hui. La comparaison court sur tout le premier chapitre de cet essai au goût de démythification. Les richesses et le développement (notamment celui de la ville de San Francisco, capitale high-tech actuelle) provoqués par la course au métal jaune ont toujours masqué une autre réalité : l'extraction a ravagé le centre de la Californie, pollué les sols, brisé des vies, creusé des inégalités. Un coût humain et environnemental qui excède de loin les bénéfices. Ce schéma se répèterait avec l'IA et les technologies numériques. Celles-ci, démontre la chercheuse fondatrice de l'institut AI Now à l'université de New York, ont un impact bien réel sur la terre, les humains, les rapports sociaux.



Le livre donne parfois à cette industrie du XXIe siècle le visage de ces usines du XIXe siècle, noires de fumée et dévoreuses de main-d'œuvre. En témoignent les visites d'un site d'extraction de lithium dans le Nevada ou d'un entrepôt Amazon. Mais il y a plus. Là où sont pointés du doigt les biais des algorithmes, Kate Crawford expose un vice plus profond : celui d'un travail bien humain de classification de données trahissant sexisme, préjugés sociaux ou raciaux, caricature. Et c'est en partant des travaux du psychologue américain Paul Ekman que l'on découvre que toutes les technologies de détection d'émotions ont pour fondement une théorie sur l'universalité des affects… qui n'a jamais pu être prouvée. En clair, si l'IA ambitionne de changer le monde, elle est surtout porteuse de visions faussées de celui-ci. ■ **Arnaud Devillard**

Contre-atlas de l'intelligence artificielle,
Kate Crawford,
Zulma, 384 p., 23,50 €

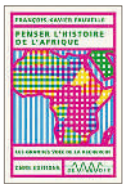
Hormones, architectes méconnues

BIOLOGIE Mélatonine, sérotonine, ocytocine… Nos hormones prennent vie — et la parole ! — dans ce livre aussi enlevé qu'instructif. Parcourez l'histoire de la recherche dans le domaine, faite d'avancées spectaculaires et de sorties de route. Découvrez où sont produites nos hormones, comment elles fonctionnent, etc. Mesurez leur influence dans notre quotidien. Prenez ainsi conscience de leur rôle vital à l'interface entre notre corps et notre cerveau, et de la nécessité qu'il y a à en prendre soin. ■ **V. G.**

Mes Hormones et moi, Franca Parianen, humenSciences, 480 p., 23,90 €

L'Afrique, des savoirs en partage

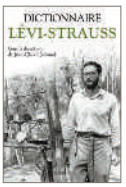
INVENTAIRE À travers un parcours de recherche mené d'un bout à l'autre du continent africain, l'auteur du célèbre *Rhinocéros d'or* (2013) revient sur *« l'incroyable richesse de l'histoire de l'Afrique antique et médiévale »*, mais aussi sur la place de ce continent dans la conversation des savoirs, où 2500 langues sont parlées. Des savoirs renouvelés qu'il faut selon lui rendre disponibles à un public plus large que celui des seuls spécialistes, l'histoire de l'Afrique étant largement ignorée. ■ **B. A.**



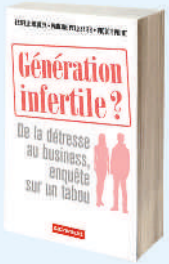
Penser l'histoire de l'Afrique, François-Xavier Fauvelle, CNRS Éditions, 98 p., 8 €

Dans les pas de Claude Lévi-Strauss

SOMME Ce dictionnaire *« d'une ampleur et ambition sans équivalent »* rassemble l'intégralité des contributions du plus célèbre anthropologue du XXe siècle, Claude Lévi-Strauss (1908-2009). De ses premières explorations ethnographiques, en 1935, aux *« concepts qu'il a marqués de son empreinte »*, cet ouvrage aux multiples entrées nous éclaire sur les rencontres déterminantes et la pensée complexe de ce théoricien du structuralisme, en passant par l'ensemble de ses œuvres. ■ **B. A.**



Dictionnaire Claude Lévi-Strauss, Sous la direction de Jean-Claude Monod, Éditions Bouquins, 1248 p., 33 €



Lever le tabou de l'infertilité

ENQUÊTE Au départ, il y a l'histoire intime des auteurs, tous confrontés à l'infertilité. De cette épreuve naît une envie : appréhender le phénomène dans toutes ses dimensions. De ce point de vue, leur ouvrage est réussi. Passage obligé : l'infertilité prise sous son angle médical et scientifique. L'occasion de rappeler qu'elle est masculine autant que féminine, qu'elle est souvent multifactorielle, que notre mode de vie comme notre environnement peuvent avoir des effets délétères sur notre capacité à procréer. Nourri par de multiples témoignages, le livre s'aventure ensuite dans les aspects plus « humains » — l'impact psychologique d'un parcours de procréation médicalement assistée (PMA) par exemple. Il fait aussi un bon état des lieux des inégalités auxquelles peuvent être confrontées les personnes engagées dans une démarche de PMA, et du business qui s'est mis en place — pour le meilleur et pour le pire — autour de cette pratique. Un livre informatif et sensible, sur un sujet dont on aimerait qu'il cesse d'être un tabou. ■ **Vincent Glavieux**

Génération infertile ?, Estelle Dautry, Pauline Pellissier et Victor Point, Autrement, 272 p., 20 €

Ce que peut vraiment l'IA pour notre santé

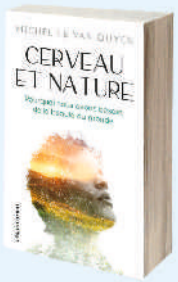
EXPERTISE Reflet des travaux du groupe Intelligence artificielle et santé créé par les Académies nationales de médecine et des sciences, cet ouvrage collectif apporte le meilleur point d'étape sur les réalisations et perspectives permises par l'émergence des techniques d'intelligence artificielle dans le domaine de la santé. 72 experts vulgarisent ces avancées et les promesses de la révolution numérique en cours. Indispensable pour faire la part entre les annonces sans lendemain et l'avenir de la médecine « augmentée ». ■ **H. J.**

Médecine et intelligence artificielle, Sous la direction de Bernard Nordlinger, Cédric Villani et Olivier Fresnoye, CNRS Éditions, 352 p., 25 €

Quand la Terre largue ses amarres

BD Le Soleil moribond est en train de passer du stade de géante rouge à celui de naine blanche. Sur Terre, l'humanité plongée dans une fournaise va bientôt affronter les ténèbres glacées, synonymes de mort certaine. Les États décident de s'embarquer pour un voyage de 2500 ans en direction d'une étoile de la constellation du Centaure. De gigantesques propulseurs lasers conduisent notre planète sur une orbite de plus en plus elliptique, avant qu'elle ne s'affranchisse de l'attraction solaire. Autant d'épreuves pour les humains qui subissent les conséquences de nouvelles donnes gravitationnelles aux conséquences dramatiques. Ce scénario futuriste étayé par de réelles données scientifiques est tiré d'une nouvelle de Liu Cixin, célèbre écrivain de science-fiction chinois, et réinterprété ici avec talent en bande dessinée. ■ **Sylvie Rouat**

La Terre vagabonde, Christophe Bec, Stefano Raffaele, Delcourt, 132 p., 21,95 €



La nature, source de bienfaits

SENS Au début de la pandémie de Covid-19, des milliards d'humains ont été coupés du vivant, mais l'effet psychologique a été plus sévère pour les urbains qui n'avaient plus accès aux parcs. Le premier enseignement de la crise sanitaire, pour le neuroscientifique Michel Le Van Quyen, est le besoin vital de nature des *Homo sapiens*. Les balades en forêt ou en montagne réduisent le stress. Des mécanismes s'activent dans le cerveau lorsque nous contemplons la mer. Les sons, les odeurs de la nature et même la présence animale nous font du bien. Et notre capacité à lutter contre la maladie pourrait être amplifiée à certaines saisons. Pour mesurer le phénomène, l'auteur explore nos cinq sens, ainsi que les dernières connaissances sur les circuits nerveux et neuronaux. Ce texte donne une résonance inédite aux poètes, écrivains, naturalistes qui ont mis en mots, bien avant les savants, notre sentiment confus que la nature était source de beauté mais aussi de bienfaits. ■ **Rachel Mulot**

Cerveau et nature, Michel Le Van Quyen, Flammarion, 272 p., 20 €

Concentré de sciences

CONNAISSANCE Comment le Britannique Stephen Gray a

fait la preuve de la conductivité de l'électricité en suspendant un enfant au-dessus du sol, comment le Tchèque Gregor Mendel a découvert l'existence des gènes en cultivant des petits pois… En décrivant de manière concise et illustrée 60 expériences clés, cet ouvrage dresse un panorama des principales découvertes qui ont façonné nos connaissances actuelles, et détaille les contextes historiques, théories, méthodes et instruments. ■ **S. R.**

Petite Histoire de la science, Tom Jackson, Flammarion, 224 p., 19,90 €

L'avenir de l'humain

QUESTIONNEMENTS D'où venons-nous ? Qui sommes-nous ? Où allons-nous ? Que pouvons-nous faire face aux bouleversements environnementaux ou technologiques ? Questions auxquelles 21 personnalités atypiques se sont attelées, faisant dialoguer biologie, médecine, neurosciences, chimie, écologie et informatique. Les questions de l'humain et de son monde

microbien, de la biodiversité, du coût énergétique de l'évolution humaine, des robots ou des métamorphoses de la civilisation européenne sont abordées. Le résultat est disparate mais stimulant. ■ **R. M.**

Sapiens : métamorphose ou extinction ?, Sous la direction d'Yves le Floc'h, Alain Berthoz et Clément Sanchez, HumenSciences, 496 p., 22,90 €

Mondes fragiles

DESTIN Animal emblématique de l'Arctique, le narval est l'un des mammifères marins les plus affectés par le changement climatique, qui réduit comme peau de chagrin la banquise sous laquelle il se préserve des orques et trouve sa nourriture. À l'autre bout du globe, l'Antarctique voit aussi ses températures s'envoler et les détritus plastiques atteindre ses rivages. Ces contrées, longtemps préservées du reste du monde, sont aujourd'hui

menacées par les pollutions, la pêche ou le tourisme. À l'heure où leur destin pourrait basculer, cet ouvrage richement illustré fait le point sur les problématiques propres aux mondes polaires. ■ **S. R.**

Au Cœur des mondes polaires, Robert Calcagno, Glénat, 144 p., 19,95 €

Laisser vivre la forêt

PLAIDOYER L'auteur de *La Vie secrète des arbres* franchit un cap dans son engagement pour la sauvegarde des forêts. Tout en continuant à mettre en valeur les prodigieuses

capacités adaptatives des arbres, dans un récit à la fois pédagogique et léger, il durcit le ton en tant que spécialiste de la gestion forestière. Il alerte sur les dangers de la monoculture, le choix d'essences à croissance rapide, privilégiées pour des raisons productivistes, et dénonce des pratiques de reboisement irréfléchies, qui rendent les forêts plus vulnérables face aux incendies. Non sans offrir des pistes pour protéger l'avenir de nos arbres *(lire aussi p. 32)*. ■ **A. De B.**

La Promesse des arbres, Peter Wohlleben, Les Arènes, 274 p., 20,90 €

Une place au Soleil

RÉFLEXIONS L'essai est aussi original qu'intéressant. Publié par une jeune philosophe, il présente une série de réflexions sur l'astre du jour : des cultes solaires aux craintes actuelles des « collapsologues », en passant par la « médecine par le soleil » de la fin du XIXe siècle, les espoirs concernant la fusion nucléaire ou encore son utilisation pour mesurer le temps. Car le soleil et le rapport que les hommes entretiennent avec la lumière naturelle ont une histoire, chaque civilisation leur ayant fait jouer un rôle singulier. En somme : dis-moi quel est ton soleil et je te dirai qui tu es ! « *Chacun y projette ses propres passions, ses propres doutes, ses angoisses comme ses rêves*, souligne ainsi Emma Carenini. *Chez les uns, le soleil est une divinité fragile et éphémère, dont la subsistance de chaque jour n'est jamais assurée ; chez les autres, c'est la lumière qui doit nous guider vers le chemin de la raison ; chez d'autres encore, c'est un astre parmi mille autres, qui ne nous enseigne que la vanité des ambitions humaines.* » ■ **Franck Daninos**

Soleil. Mythes, histoire et société, Emma Carenini, Le Pommier, 198 p., 20 €

VIVA TECHNOLOGY

LE PLUS GRAND ÉVÈNEMENT STARTUP & TECH EN EUROPE

15-18 JUIN PARIS

IT'S FASTER HERE*

LES STARTUPS ET LES INNOVATIONS DE DEMAIN SONT À VIVATECH POUR METTRE LES SOLUTIONS AU SERVICE DES GRANDS ENJEUX DE NOTRE SOCIÉTÉ

RENDEZ-VOUS SUR VIVATECHNOLOGY.COM

* ça va plus vite ici

ÉCONOMISEZ JUSQU'À 25% SUR L'ACHAT DE VOTRE TICKET
(OFFRE SPÉCIALE JUSQU'AU 10 MAI 2022 INCLUS)

CO-ORGANISATEURS

PUBLICIS GROUPE

Groupe Les Echos Le Parisien

CNN africanews. euronews.next i24 L'ÉQUIPE THE WALL STREET JOURNAL. Read ambitiously webedia. BFM BUSINESS

EXPOSITIONS

Chambéry (73)

Mission corps humain
Une exposition et diverses activités sont consacrées à la connaissance du corps humain. À la portée des enfants à partir de 8 ans, le contenu détaille les organes et leurs fonctions, les secrets de la peau ou des muscles. Le tout dans le cadre soit d'une visite guidée, soit d'un jeu façon mission à remplir.
Galerie Eurêka, Carré Curial, 150, rue de la République, jusqu'au 27 août. Rens. : 04.79.60.04.25.

Dunkerque (59)

Océan
Cette exposition itinérante s'arrête ce mois-ci à Dunkerque. Conçue sur le mode immersif, avec une fresque de 40 m et un film à 360° sous un dôme de 6 m de haut, elle dévoile les richesses des profondeurs marines, tant pour un public d'adultes que pour les enfants.

Halle aux sucres, 9003, route du quai Freycinet 3 môle 1, du 30 avril au 22 mai. Rens. : expo-ocean.fr

Lewarde (59)

Trésors insolites
80 objets scientifiques et documents techniques en lien avec l'extraction du charbon. Des instruments étranges, peu connus, dont il s'agit ici de percer les secrets et d'expliquer la vocation, côtoient des illustrations quasi artistiques sur la géologie du sous-sol.
Centre historique minier, fosse Delloye, rue d'Erchin, jusqu'au 29 mai. Rens. : 03.27.95.82.82.

L'Isle-Adam (95)

Claire Illouz, les abords du paysage
Les peintures à l'huile, eaux-fortes, lavis ou aquarelles de cette artiste ont pour thème une vision un peu particulière des paysages : celle des espaces délaissés par l'humain et repris par la nature. Talus et herbes folles, mais aussi représentations du sous-sol sont à l'honneur.
Musée d'Art et d'Histoire Louis-Senlecq, 31, Grande Rue, jusqu'au 18 septembre. Rens. : 01.74.56.11.23.

Lyon (69)

Magique
C'est une autre version de l'exposition Magie-Sorcellerie du Muséum de Toulouse que présente ici le musée des Confluences. En 400 pièces archéologiques et ethnographiques, le parcours aborde les pratiques magiques à travers l'histoire et les différentes cultures.
Musée des Confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 5 mars 2023. Rens. : 04.28.28.12.12.

Paris (75)

Juifs et musulmans en France
Présentées généralement sous l'angle d'un conflit ancestral, les relations entre juifs et musulmans bénéficient ici d'une approche historique mettant en relief le rôle de la France. Œuvres, archives, photographies éclairent un sujet complexe en remontant à l'époque des colonies d'Afrique du Nord.
Musée national de l'histoire de l'immigration, 293, avenue Daumesnil, jusqu'au 17 juillet. Rens. : 01.53.59.58.60.

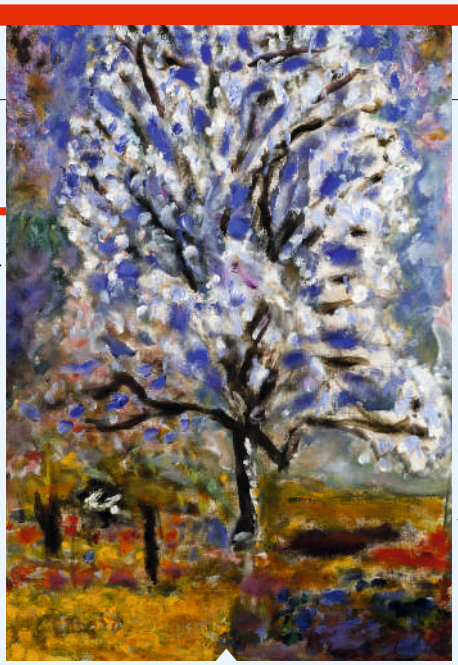
Toulouse (31)

Actuellement dans l'ISS
Dans un décor suggérant une salle de contrôle, divers dispositifs permettent de suivre les astronautes de l'Agence spatiale européenne. Le visiteur assiste à leur préparation au sol, fait le voyage vers la Station spatiale internationale (ISS) et est témoin des sorties extra-véhiculaires et des missions.
Cité de l'Espace, avenue Jean-Gonord. Rens. : 05.67.22.23.24.

Deauville (14) / Exposition

Vous êtes un arbre !

Imaginez : vous êtes un arbre ! Cette riche exposition, installée dans un ancien orphelinat magistralement rénové, l'affirme. Elle repose sur les regards croisés des sciences et de l'art autour d'un être vivant auquel l'humain, fasciné, souvent se compare. Arbre-cosmos, arbre-homme, arbre-paysage, arbre-signe, arbre-matière : les cinq sections dans lesquelles peintures, sculptures, vidéos, gravures et photos se partagent un lumineux espace dévoilent des œuvres exceptionnelles. Anciennes, tel le frontispice du volume *Arbor Scientiae* du théologien Raymond Lulle (1515, Bibiothèque nationale de France), où les racines de l'arbre relient les principes divins et logiques. Modernes, comme le magnifique *Amandier en fleurs* de Pierre Bonnard (1947, musée d'Orsay).



RMN-GRAND PALAIS (MUSÉE D'ORSAY) / IMAGE RMN-GP

« L'Amandier en fleurs », de Pierre Bonnard (1867-1947).

Et contemporaines, comme la forêt de carton d'Eva Jospin ou le dessin à l'encre de la structure interne d'un tronc d'Iglika Christova. Ne faites pas l'impasse sur le beau catalogue, augmenté des contributions des commissaires scientifiques. *(Lire aussi notre dossier p. 32.)* ■ **Andreina De Bei**

Les Franciscaines, 1454b, avenue de la République, jusqu'au 5 juin. Rens. : 02.61.52 29.20.

PARTENARIAT

Paris (75)

Destination Cosmos
Quitter la Terre, parcourir le Système solaire jusqu'à en sortir pour plonger dans l'infini du cosmos : le voyage visuel et sonore créé en 2021 en collaboration avec le Centre national d'études spatiales est de retour à l'Atelier des lumières pour 14 soirées. (Lire notre visite : sciav.fr/903cosmos)
38, rue Saint-Maur, du 22 avril au 7 mai. Rens. : www.atelier-lumieres.com

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

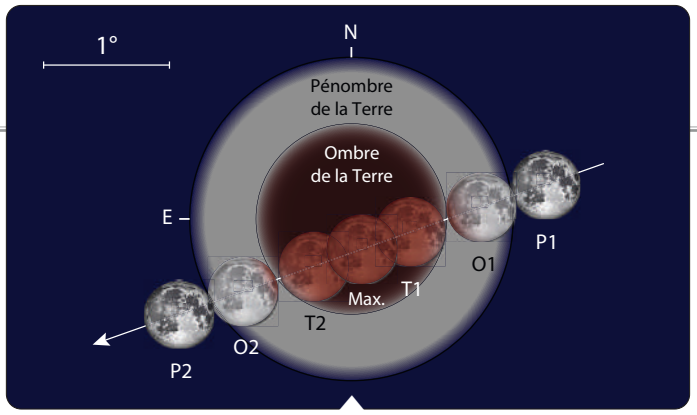
PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

MERCURE La petite planète est observable vers le couchant durant les premiers jours du mois, avant de disparaître dans les lumières du crépuscule. Elle passe en conjonction inférieure le 21. Nous la retrouverons en juin, le matin, dans un alignement spectaculaire de toutes les planètes du Système solaire !

VÉNUS L'étoile du Berger est visible au petit matin, bas vers le levant. Très brillante, elle se lève environ 1 h 30 avant l'astre du jour.

MARS D'une luminosité encore médiocre, la planète Rouge se lève en fin de nuit. Elle sera aisément identifiable en seconde quinzaine en raison de son rapprochement avec Jupiter. Mars quitte la constellation du Verseau pour les Poissons le 19.



Les différentes phases de l'éclipse : entrée dans la pénombre (P1), entrée dans l'ombre (O1), début (T1) et fin (T2) de la phase de totalité, sortie de l'ombre (O2) et sortie de la pénombre (P2).

Une éclipse totale de Lune

DANS LA NUIT DU 15 AU 16, il y aura une éclipse totale de Lune dont les premières phases seront visibles en France métropolitaine. Le phénomène général débutera à 3 h 32 par l'entrée dans la pénombre (P1). La phase de totalité, durant laquelle notre satellite, obscurci, se parera d'une teinte rougeâtre, commencera à 5 h 29 (T1). C'est durant cette phase que la Lune passera sous l'horizon.

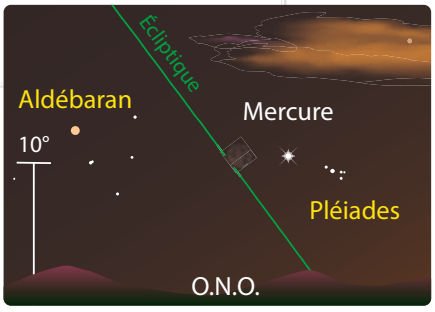
Notre conseil Assurez-vous d'avoir un horizon sud-ouest bien dégagé. L'observation d'une éclipse de Lune ne nécessite aucune précaution particulière.

JUPITER La plus imposante planète du Système solaire, très brillante, domine le ciel de fin de nuit… jusqu'au lever de l'éclatante Vénus. On la trouve près de cette dernière en début de mois et proche de Mars en fin de mois.

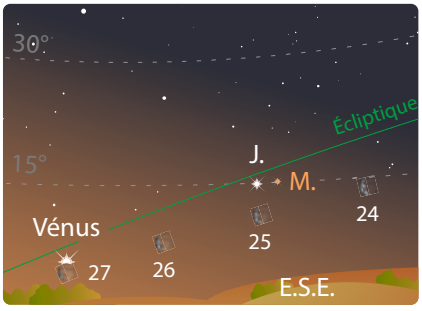
SATURNE D'un éclat comparable à celui de Mars, la planète aux anneaux se lève en seconde partie de nuit. Aux lueurs de l'aube, on peut l'observer vers le sud-est à une vingtaine de degrés de hauteur.

L'appli du mois

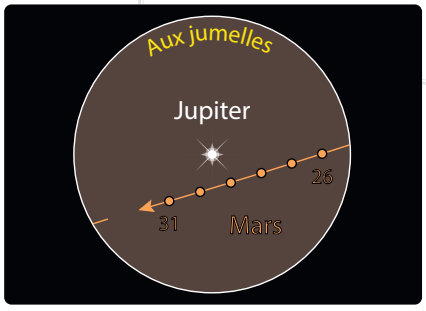
CARTE DU CIEL est une application gratuite en français pour Android et iOS. Elle calcule et montre en temps réel la position des étoiles et planètes visibles depuis votre localité. Il vous suffit de pointer votre appareil vers le ciel et elle vous dira précisément ce que vous êtes en train de regarder.



LE SOIR DU 2, 45 MINUTES APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, admirez le bel alignement d'un très fin premier croissant de Lune, de la planète Mercure et de l'amas d'étoiles des Pléiades.



LES MATINS DU 24 AU 27, 45 MINUTES AVANT LE LEVER DU SOLEIL, la Lune en dernier croissant rendra visite aux planètes Mars (M.), Jupiter (J.) et Vénus vers le levant.



LE MATIN DU 29, MARS NE SERA QU'À UN PEU PLUS D'UN DEMI-DEGRÉ DE JUPITER. Un joli rapprochement à suivre aux jumelles pendant quelques jours autour de cette date.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de mai

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 3.

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec, groupe 1.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CÉLINE GUIVARCH ET CHRISTOPHE CASSOU

Le verre à moitié vide ou à moitié plein de l'atténuation

Des solutions d'atténuation pour limiter le changement climatique par la réduction des émissions de gaz à effet de serre existent dans tous les secteurs : transport, logement, industrie, alimentation, agriculture, forêts, villes, finance… Multifacettes, elles résident dans des technologies, des transformations de nos modes de consommation et de production, de nos infrastructures, de nos organisations sociales… Dans tous les aspects, il y a des signes de progrès, mais aussi des défis qui persistent, ainsi que l'évalue le troisième volet du 6e rapport du Giec, publié début avril. Un nombre croissant de pays voient maintenant leurs émissions territoriales baisser, mais les émissions mondiales restent à la hausse. Les technologies bas carbone ont vu leurs coûts réduits (de 90 % en dix ans pour l'énergie solaire, par exemple), leur implémentation accélérée, leurs performances améliorées, mais la vitesse de déploiement est trop lente pour rester sous le seuil de 2 °C de réchauffement global. Certes, de plus en plus de politiques d'atténuation sont mises en place, mais elles restent en deçà de l'enjeu. L'engagement des citoyens et des entreprises vis-à-vis de la question climatique est également croissant, mais il est désormais établi que le transfert des connaissances vers l'action a été largement sapé par un ensemble de contre-mouvements. Le constat scientifique sur la base des trois volets du 6e rapport du Giec est sans équivoque. Il est temps d'amplifier les progrès et de dépasser les défis : les modifications graduelles ne suffisent plus, et seul un changement fondamental, dès maintenant et dans tous les aspects de la société, permettra de limiter le réchauffement bien en dessous de 2 °C. ■

Directrice de l'institut Henri-Poincaré, à Paris.

CAMILLE CIER/HANS LUCAS

MATHÉMATIQUES PAR SYLVIE BENZONI

La carte n'est pas le territoire

La carte est une représentation visuelle, parfois tactile, d'une partie de notre monde, une partie « concrète » que nous pourrions parcourir pour de vrai. Savoir lire une carte est une capacité d'abstraction largement partagée, même si elle se perd depuis qu'on a des GPS. Le langage en est une autre. Les enfants apprennent sans mal le concept de table, par exemple, malgré la variété de formes et de tailles de celle-ci. Les capacités d'abstraction sont bien moins partagées lorsqu'il s'agit de les mettre en œuvre en mathématiques, une discipline qui allie fortement représentations et langage.
Le langage mathématique a cet avantage sur le langage courant qu'il est parfaitement défini. Les définitions se construisent les unes après les autres, elles ne tournent pas en rond comme celles du dictionnaire. Cela ne les empêche pas de conduire à des représentations variées. Un même objet mathématique peut être figuré de diverses manières. C'est le cas du tore, qu'on peut voir comme une bouée, objet concret, ou comme un carré dont on recollerait les côtés opposés : cette représentation est une carte mentale, on ne peut pas la réaliser en papier. S'exercer à se représenter mentalement les mathématiques est un sport comme un autre, qui repose sur la plasticité du cerveau. C'est l'un des messages portés par David Bessis dans son livre *Mathematica*. Les mathématiques sont une gymnastique de l'esprit à partager plus largement ! ■

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Du fruit défendu à la dentelle neurale

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

BRUNO LÉVY

Les tenants des religions abrahamiques l'affirment : Dieu chassa Ève et Adam du jardin d'Éden après qu'ils croquèrent dans le fruit de l'arbre de la connaissance du bien et du mal — une pomme, encore que les avis divergent sur ce point —, en dépit de l'interdiction qui leur avait été formulée explicitement. L'interprétation de cet épisode, et de la condamnation qui s'ensuivit, varie selon les exégètes. Pour certains, la connaissance, en tant que telle, ne saurait être en cause, et le fait que l'humanité y accède, non plus ; ce qui le serait, c'est d'avoir enfreint la loi et, surtout, mangé du fruit de l'arbre sans avoir contribué à son élaboration, autrement dit, d'accéder immédiatement au savoir, sans effort.

Avec le projet Neural Lace — « dentelle neurale » en français — la société Neuralink lancée en 2017 par le célèbre homme d'affaires américain Elon Musk, promet de développer des implants cérébraux à deux fins. Une visée thérapeutique d'abord, pour soigner des affections neurologiques comme la maladie de Parkinson, les épilepsies ou les démences séniles, en particulier la maladie d'Alzheimer, et certains troubles psychiques comme la dépression. Un projet beaucoup plus ambitieux ensuite, afin de connecter notre cerveau à des dispositifs électroniques de stockage d'information, en vue d'étendre ses capacités. Dès lors, nous saurons sans prendre la peine d'apprendre, car il suffira de brancher le bon module. Alors que la visée thérapeutique paraît louable, la seconde est tout à la fois douteuse au plan technique et condamnable au plan moral. Rien, dans les résultats scientifiques actuels, n'autorise à affirmer que l'on saura fabriquer dans un délai raisonnable des implants cérébraux électroniques en mesure d'accroître nos capacités cognitives. Et, si cela advenait, nous serions contraints d'admettre des connaissances sans nous les approprier, sans les interpréter et, par là, sans pouvoir les remettre en cause. Comment dès lors ne pas craindre une calamité pire que celle qui chassa Ève et Adam du jardin d'Éden ! ■

L'ŒIL DE LASCAR

Le projet de train à grande vitesse propulsé dans des tubes sous vide, l'Hyperloop, a été relancé en 2013 par Elon Musk. Si le milliardaire américain s'est depuis tenu éloigné de son développement, plusieurs compagnies se sont engagées dans l'aventure. Presque dix ans après, le constat est amer : Hyperloop TT renonce à sa piste d'essai d'un kilomètre à Francazal, près de Toulouse, et Virgin Hyperloop abandonne l'idée du transport de passagers pour se concentrer sur le fret. La seule bonne nouvelle vient de TransPod, qui lève 550 millions de dollars pour développer une ligne de 17 km au Canada. **O. L.**

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

NEUROSCIENCES

Comment la musique nous procure-t-elle du plaisir ?

Vinh H. L.

En 2019, une équipe germano-norvégienne a réalisé une étude sur de la musique pop qui suggère que le plaisir musical est très élevé lorsque les accords d'une musique prévisible surprennent l'auditeur. Corrélativement, à l'écoute d'un motif musical atypique, les participants ont évalué comme les plus plaisants les accords les moins surprenants. L'auditeur forme donc en permanence des attentes sur la mélodie. Les zones cérébrales qui sont impliquées jouent un rôle dans le traitement des émotions, l'apprentissage et la mémoire ainsi que le traitement du son. ■

Camille Gaubert @CamilleGaubertb

MATHÉMATIQUES

Pourquoi ne peut-on pas diviser par zéro ?

Tabu N. L.

Diviser par un nombre, c'est en fait multiplier par son inverse. Diviser par zéro reviendrait donc à multiplier par l'inverse de zéro. Et c'est ici que la machine se grippe. Prenons z, un nombre quelconque. Par définition, l'inverse de z est le nombre z' tel que z x z' = 1. Trouver l'inverse de 0, c'est trouver un nombre z' tel que 0 x z' = 1. Ce qui est impossible : on peut multiplier n'importe quoi par zéro, on obtiendra toujours zéro. Zéro n'a donc pas d'inverse. Par conséquent, on ne peut pas multiplier par l'inverse de zéro et on ne peut donc pas diviser avec celui-ci. Par convention, la division par zéro donne un résultat qui tend vers l'infini. ■ **Vincent Rea**

JOHN HARRIS/REPORT DIGITAL-REA

Un végétalisme universel ferait chuter de 73 % les émissions de CO_2 du secteur agricole, selon une étude franco-suisse.

ÉCOLOGIE

Adopter une alimentation végétale permet-il de réduire la pollution ?

Delphine P.

Manger de la viande conduit à émettre plus de pollution (émissions de gaz à effet de serre, utilisation des terres et pollution des eaux) que la seule consommation de plantes : cela a été confirmé en 2018 par des chercheurs franco-suisses qui ont analysé le bilan carbone des 40 principaux aliments consommés dans le monde. Ainsi, pour obtenir 100 g de protéines de bœuf, il faut disposer de 370 m² de terre et émettre 105 kg de CO_2. En comparaison, 100 g de protéines de pois ou de haricots ne demandent que 1 m² de sol produisent que 300 g de gaz à effet de serre, même en comptant la transformation du produit de base, son emballage et son transport. Produit animal le moins émetteur, l'œuf de poule, avec 10 kg de CO_2 pour 100 g de protéines, reste quatre fois plus polluant que le tofu, le végétal le plus émetteur. Ainsi, la viande et le lait ne procurent que 18 % des calories et 37 % des protéines nécessaires aux humains, mais produisent 60 % des émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture. L'une des surprises de ces travaux, c'est le poids de l'aquaculture : si l'élevage des crustacés (principalement la crevette) ne réclame que 1 m² pour 100 g de protéines, il peut cependant dépasser les rejets en méthane et CO_2 de l'élevage bovin. Un végétalisme universel permettrait ainsi de réduire les émissions du secteur agricole de 73 %. Pour commencer, éviter le lait et la viande est le meilleur moyen de réduire l'empreinte écologique de l'humanité, d'après cette équipe franco-suisse. ■

Loïc Chauveau @Loic_Chauveau

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 902, avril 2022

Un jour au Cambodge

Les lettres rouges sont la première occurrence d'une lettre apparaissant dans un mot à la place qu'elle occupe dans l'alphabet. Par exemple, le a de au et le premier c de bicyclette apparaissent bien aux rangs 1 et 3 des mots respectifs.

Devraient être rouges le d de sandalettes et le b d'abrasif.

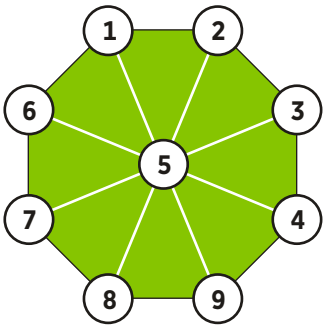
Avril vingt-deux ?

Les lettres rouges sont ajoutées et les bleues remplacées:

A	V	R	I	L				
R	I	V	A	L	E			
L	I	V	A	R	D	E		
V	A	L	I	D	E	U	R	
V	I	A	N	D	E	U	R	L devient N
V	I	D	A	N	G	E	U	R
D	I	V	A	G	U	E	N	T R devient T
V	I	N	G	T	D	E	U	X A devient X

Magie dans l'octogone

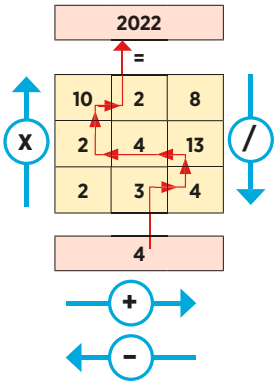
Une solution :



Deux hommes et un cheval

Les deux hommes partent ensemble. Le piéton s'arrête au bout d'une heure, ayant fait 6 km. Il trouve le cheval qui l'attend depuis 1/2 heure puisqu'il est deux fois plus rapide. Même chose l'heure suivante et ainsi de suite. Le cheval se repose la moitié du temps.

Labyrinthmétique



Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 895
Explorer l'espace

N° 896
Les super pouvoirs du cerveau

N° 897
Tempêtes, chaleur extrême, inondations

N° 898
Découverte d'un continent englouti

N° 899
Les 10 découvertes de l'année 2021

N° 900
Gravitation : la théorie qui dépasse Einstein

N° 901
Le nucléaire peut-il être propre ?

N° 902
Quantique, la révolution du XXIe siècle

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45 av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 895 ❑ N° 896 ❑ N° 897 ❑ N° 898
❑ N° 899 ❑ N° 900 ❑ N° 901 ❑ N° 902

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

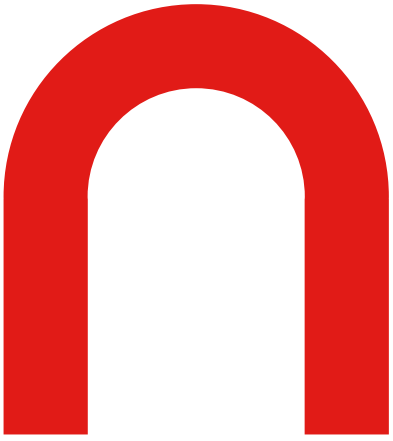
PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

Six parties ?

Pouvez-vous partager cet aimant en six parties en traçant seulement deux lignes droites ?



Une division éclatée

Saurez-vous remplacer chaque lettre par un chiffre pour que la division soit juste ?

A	B	C	D	E	F	G	
	–	–			A	B	H
		–	–	–			
		–	–	–			
			K	K			

Carré latin

Complétez ce carré dans lequel chaque ligne et chaque colonne sont composées des nombres de 1 à 8. Les sommes des segments horizontaux et verticaux figurent en marge.

		17	19	9	6	11	23	9	7
		13	15	13	11	12	11	21	23
6	21				■	■			
	34								■
10	15			■				■	■
10	9			■	■	■			
8	14	■	■	■		■			
15	13					■	■		
10	20				■				
19	16				■				

La loi du chèvrefeuille

En revenant de voyage, Timothée fait le point sur les hôtels qu'il a fréquentés.

Il en tire les réflexions suivantes :

- **1. Lorsque la cuisine est bonne, les serveuses sont accortes.**
- **2. Aucun hôtel ouvert toute l'année ne manque d'avoir vue sur la mer.**
- **3. La cuisine n'est déplorable que dans certains hôtels bon marché.**
- **4. Les hôtels qui possèdent une piscine ont du chèvrefeuille sur les murs.**
- **5. Les hôtels dont les serveuses sont désagréables sont ceux qui ne sont ouverts qu'une partie de l'année.**
- **6. Aucun hôtel bon marché n'admet les chiens.**
- **7. Les hôtels sans piscine n'ont pas vue sur la mer.**

Question : Dans ces hôtels, les propriétaires de chien ont-ils l'espoir de jouir du chèvrefeuille ?

Encore plus petit ?

Écrivez le plus petit nombre positif possible en utilisant totalement et exclusivement ces seize signes.

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 + - + - x /

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

TSF JAZZ, LA RADIO 100% JAZZ ET LE CHÂTEAU DE CHANTILLY PRÉSENTENT

TSF JAZZ CHANTILLY FESTIVAL

MELODY GARDOT
IBRAHIM MAALOUF
MICHEL PORTAL - MP85
RHODA SCOTT LADY ALL STARS
ROBERTO FONSECA
CIMAFUNK
KENNY GARRETT
GEORGE CABLES
BELMONDO QUINTET
CYRILLE AIMÉE
TCHAVOLO SCHMITT
THE AMAZING KEYSTONE BIG BAND
EMMET COHEN
BIG IN JAZZ COLLECTIVE
JEANNE MICHARD
HOT SUGAR BAND

SAMEDI 2 ET DIMANCHE 3 JUILLET 2022

MIDI > MINUIT

PARC DU CHÂTEAU DE CHANTILLY

Billetterie et renseignements :
www.tsfjazzchantillyfestival.com

Concert d'ouverture
vendredi 1er Juillet
ABDULLAH IBRAHIM SOLO

Château de Chantilly
INSTITUT DE FRANCE

OFFICE DE TOURISME CHANTILLY-SENLIS

Avec le soutien de

Vive le Jazz

YAMAHA

Libération

france•tv

Télérama

L'OR

Découvrez

L'ALLIANCE PARFAITE
D'ARÔMES INCOMPARABLES

L'OR SANS DOUTE LE MEILLEUR CAFÉ DU MONDE

JACOBS DOUWE EGBERTS FR SAS - 30 BIS RUE DE PARADIS, 75010 PARIS, FRANCE - 810 029 413 RCS PARIS - SAS AU CAPITAL DE 16.594.157,70 EUROS.